



TESIS DOCTORAL

Análisis experimental y numérico del taladrado de materiales compuestos.

Autor:

Antonio Díaz Álvarez

Director/es:

Henar Miguélez Garrido

Carlos Santiuste Romero

Tutor:

Henar Miguélez Garrido

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Leganés, Noviembre 2017

TESIS DOCTORAL

ANALISIS EXPERIMENTAL Y NUMERICO DEL TALADRADO DE MATERIALES COMPUESTOS

Autor: *Antonio Díaz Álvarez*

Director/es: **Henar Miguélez Garrido**
 Carlos Santiuste Romero

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: José Luis San Román García

Vocal: Eugenio Giner Maravilla

Secretario: María Rosario Domingo Navas

Calificación:

Leganés, 24 de Noviembre de 2017

A mi familia....

A mis padres, por su esfuerzo incansable para verme siendo lo que hoy día soy, por ser mis fuerzas y mi empuje en los momentos de flaqueza y por recordarme que con esfuerzo y lucha puedo conseguir cualquier cosa....

A mis hermanos, Leticia y José, por estar siempre a mi lado, por ser un referente a lo largo de mi vida y por creer en mí, incluso cuando ni yo mismo lo hago....

A María, por aparecer en mi vida y darle un nuevo sentido, por hacer de una carrera de obstáculos un simple paseo, por ser mi apoyo y refugio en los días grises y por dejarme hincar la rodilla únicamente para levantarme con más fuerza....

Agradecimientos.

Quisiera comenzar estas líneas agradeciendo a Henar Miguélez su confianza, confianza que depositó en mí desde el primer momento en el que me dio la oportunidad de embarcarme en éste proyecto, sin importar de donde procedía y posibilitando que hoy sea lo que soy.

A mis directores de tesis, Henar Miguélez y Carlos Santiuste, por su enorme paciencia en los momentos de más trabajo, por su experiencia, por todo lo que me han enseñado y por la posibilidad de culminar ésta etapa de mi vida tan enriquecedora.

A mis compañeros y por encima de todo amigos: Jose Luis Cantero, Marcos, Ana, Xavier, Miguel, Norberto, Nacho, Héctor, Diego, Jairo, Patricia...y un largo etc; a todos ellos, por hacer que venir al trabajo sea algo sencillo, por sus buenos consejos y sobre todo por su apoyo a lo largo de éste proyecto.

Por todo lo bueno vivido y por todo lo que está por venir....

Resumen

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta están muy extendidos en la industria. En estos procesos, el tamaño de la pieza original circunscribe la geometría final, y el material sobrante es arrancado en forma de virutas. El taladrado es especialmente importante dentro de este conjunto de procesos, ya que se utiliza frecuentemente al final del proceso de fabricación, por lo que un fallo puede representar cuantiosas pérdidas.

Los materiales compuestos se emplean ampliamente en diferentes sectores industriales debido principalmente a propiedades como su elevada resistencia, su baja densidad y buena resistencia a la corrosión. Dentro de éstos, los más empleados son los materiales compuestos con refuerzos de fibras largas.

El daño mecánico del material que se produce en los procesos de mecanizado de los materiales compuestos es muy relevante debido principalmente a su disposición en

forma de apilado y a la separación de las mismas durante el procesado de éste, originando su consecuente merma de propiedades.

El objetivo principal de esta Tesis es el análisis del proceso de taladrado en seco de distintos materiales compuestos, pertenecientes a las familias de: fibra de carbono, fibras de aramida y naturales. Los defectos en la superficie alrededor del taladro, así como la posible separación de las láminas son especialmente significativos en este tipo de procesos, lo que justifica el interés del objetivo planteado. Se ha llevado a cabo un estudio experimental, realizando ensayos de taladrado con herramientas de distintas geometrías, y diferentes parámetros de corte. Durante el proceso se determinó la evolución de la fuerza de avance, el par torsor, así como los posibles defectos presentes en los materiales durante el mismo. De igual forma, se desarrolló y validó, un modelo numérico tridimensional basado en Elementos Finitos, reproduciendo las condiciones de corte consideradas.

A continuación, se indican las principales aportaciones del trabajo realizado en el marco de esta Tesis.

- Se ha desarrollado una metodología de ensayos de taladrado que permite obtener experimentalmente la fuerza axial y el par torsor.
- Se han diseñado y fabricado los utillajes específicos requeridos para el posicionamiento y fijación del material, herramientas e instrumentación. También se ha realizado la puesta a punto y verificación del sistema.
- Se han realizado ensayos de taladrado en seco sobre materiales compuestos de fibra de carbono, fibras de aramida y fibras naturales, empleando diferentes condiciones de corte, y brocas con distintas geometrías por cada material. Los resultados experimentales obtenidos presentan una gran repetibilidad y se corresponden con un amplio rango de condiciones de mecanizado.
- El análisis de los resultados experimentales obtenidos ha permitido establecer los parámetros de corte y geometrías de broca óptimos para cada material estudiado, minimizando el daño generado durante el proceso de taladrado.

- Se ha desarrollado un modelo numérico tridimensional de procesos de taladrado en seco de los distintos materiales compuestos para cada geometría de broca. El modelo ha sido validado experimentalmente obteniéndose una buena correlación en relación con las fuerzas de mecanizado.

Abstract

Machining processes are widely used in industry. In these processes, the size of the original piece circumscribes the final geometry, and the excess of material is removal. Drilling is especially important within this set, since it is widely used and it is often performed at the end of the manufacturing route, so a failure can represent large losses.

Composites are widely used in different industrial sectors mainly due to properties such as high strength, low density and very good resistance to corrosion. Among these, the most used are composite materials with long fiber reinforcements.

The mechanical damage of the material that is produced in the machining processes of the composite materials is very relevant due to its layering and the separation of the same during the processing of this one, causing its consequent property loss.

Main objective of this thesis is the analysis of dry drilling process of different composite materials: carbon fiber, aramid and natural fibers. The defects in the surface

around the drill, as well as the possible separation of the layers are especially significant in this type of processes, which justifies the interest of the proposed objective.

For this purpose, drilling tests were carried out with different tool geometries, and considering different cutting parameters. During the process the evolution of the feed force, torque and possible defects in materials during the process were determined. In the same way, a three - dimensional numerical model based on Finite Elements was developed, and validated reproducing the considered cutting conditions.

Main contributions of the work carried out in the framework of this thesis are indicated below.

- A drilling test methodology has been developed and applied, allowing experimental determination of axial force and torque.
- The specific tooling required for positioning and fixing the material, tool and instrumentation have been designed and manufactured. The system has also been set up and verified.
- Dry drilling tests were carried out on carbon fiber, aramid fibers and natural fibers, using different cutting conditions and drills with different cutting geometries for each material. The experimental results obtained are highly reliable and correspond to a wide range of machining conditions.
- The analysis of the experimental results obtained allowed establishing the optimum cutting parameters and drill geometries for each material studied, trying to minimize the damage generated during the drilling process. For this reason, they represent a novel contribution of interest for the knowledge of the processes of dry drilling on composite material.
- A three-dimensional numerical model of dry drilling processes of the different composite materials for each drill geometry has been developed. The model has been validated experimentally obtaining a good correlation in relation to the machining forces.

Índice

CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1. MARCO DE LA TESIS Y MOTIVACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	4
1.4. CONTRIBUCIONES ORIGINALES.....	5
CAPÍTULO 2: Estado del arte	7
2.1. PROCESOS DE TALADRADO	7
2.2. MATERIALES COMPUESTOS.....	11
2.2.1. Fibras	18
Fibra de Carbono:	18
Fibra de Polímeros:.....	19
Fibras Naturales:.....	20
2.2.2. Principales defectos durante el taladrado	23
Delaminación:.....	23
Fuzzing:	26
2.3. EL TALADRADO DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS DE CARBONO, ARAMIDA Y NATURALES.....	27
2.3.1. Fibra de carbono.....	27
2.3.2. Fibra de aramida.....	34
2.3.3. Fibras naturales.....	38
2.4. MODELOS NUMÉRICOS PARA LA SIMULACIÓN DEL TALADRADO.....	41
CAPÍTULO 3: Trabajo experimental	45
3.1. INTRODUCCIÓN.....	45
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	50
3.2.1. Fibra de Carbono	50
Material.....	50

Geometrías de Broca y Parámetros de Corte.....	51
Delaminación.....	52
Resultados.....	52
Comparación entre el material compuesto en forma de tejido o en cinta.....	61
Otros defectos superficiales.....	62
Conclusiones Parciales.	64
3.2.2. Fibra de Aramida	65
Material.....	65
Geometrías de Broca y Parámetros de Corte.....	66
"Fuzzing".	66
Resultados.....	67
Conclusiones Parciales.	72
3.2.3. Fibras Naturales	73
Material.....	73
Geometrías de Broca y Parámetros de Corte.....	75
"Fraying".	76
Resultados.....	77
Conclusiones Parciales.	90
CAPÍTULO 4: Modelización numérica	93
4.1. INTRODUCCIÓN.....	93
4.2. MODELO CONSTITUTIVO	95
4.2.1. Resultados de ensayos	95
4.2.2. Modelo Constitutivo	96
Ecuaciones constitutivas.....	97
Respuesta a la tensión-deformación.	100
Respuesta de relajación.	100
4.2.3. Calibración del modelo.....	101

4.2.1. Validación del modelo.....	104
4.3. DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.	105
4.3.1. Materiales	105
Material de la Pieza.	105
Material de la Herramienta.	107
4.3.2. Condiciones de mecanizado modelizadas	107
4.3.3. Geometrías.....	108
Geometría de la Pieza.	108
Geometría de las herramientas.	109
4.3.4. Contacto Herramienta-Material.....	110
4.3.5. Condiciones de contorno	111
4.3.6. Mallado de la pieza y la herramienta.....	112
4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.	113
4.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS.....	116
4.5.1. Cuantificación del daño	116
4.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.	120
CAPÍTULO 5: Conclusiones y trabajos futuros.....	123
5.1. CONCLUSIONES Y APORTACIONES ORIGINALES.....	123
5.1.1. Conclusiones y aportaciones relativas al trabajo experimental.	123
Fibra de Carbono:	124
Fibra de Aramida:	124
Fibras Naturales:.....	125
Tabla resumen:	126
5.1.2. Conclusiones y aportaciones relativas al modelo numérico.	126
5.2. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS.....	127
5.3. PUBLICACIONES EN CONGRESOS Y REVISTAS.....	128
5.3.1. Publicación en revistas JRC.	128

5.3.2. Publicación en congresos.....	129
CAPÍTULO 6: Bibliografía.....	131

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1. Evolución de la Velocidad de corte nominal en una broca helicoidal estándar [4].</i>	8
<i>Figura 2.2. Ejemplo de distintos tipos de brocas en el mercado [5].</i>	9
<i>Figura 2.3. Ángulos y filos principales de la broca [6].</i>	10
<i>Figura 2.4. a) Corte ortogonal; b) Corte Oblicuo.</i>	11
<i>Figura 2.5. Representación gráfica de las propiedades mecánicas de las matrices.</i>	14
<i>Figura 2.6. Clasificación de los materiales compuestos en base a la microestructura de la fase dispersa.</i>	15
<i>Figura 2.7. a) Nomenclatura relativa a la orientación de las fibras; b) Influencia de la orientación de las fibras sobre la resistencia a tracción (Mpa) [18].</i>	17
<i>Figura 2.8. Fibra de Carbono empleada como refuerzo.</i>	18
<i>Figura 2.9. Precio de las principales fibras empleadas como refuerzo en la fabricación de materiales compuestos.</i>	19
<i>Figura 2.10. Fibra de Kevlar</i>	20
<i>Figura 2.11. Fibras naturales (Lino)</i>	21
<i>Figura 2.12. Polímeros vegetales.</i>	22
<i>Figura 2.13. Precios de las principales matrices empleadas para la fabricación de materiales compuestos.</i>	22
<i>Figura 2.14. Imagen SEM de fallo por delaminación sobre material compuesto [28].</i>	23
<i>Figura 2.15. a) Delaminación de salida; b) Delaminación de entrada.</i>	24
<i>Figura 2.16. Influencia del ángulo de punta sobre la delaminación.</i>	24
<i>Figura 2.17. Medida del daño mediante el factor de delaminación unidimensional [2].</i>	25
<i>Figura 2.18. Imagen SEM de la presencia de Fuzzing durante el taladrado de material compuesto.</i>	26
<i>Figura 2.19. Defecto de "spalling" en el taladrado de materiales compuestos.</i>	33
<i>Figura 2.20. Casco de Combate con visera y protección de mandíbula.</i>	35
<i>Figura 3.21. Centro de mecanizado Kondia mod. B-500.</i>	46
<i>Figura 3.22. a) Útil de aspiración de fibras durante el proceso de taladrado; b) acople y fijación del útil al centro de mecanizado y así como al sistema de aspiración.</i>	46
<i>Figura 3.23. Placa inferior del utillaje para permitir la delaminación de la muestra en los distintos diámetros nominales a ensayar (6, 5 y 3 mm).</i>	47

<i>Figura 3.24. a)Dinamómetro piezoeléctrico rotativo Kistler Modelo 9123C; b)Ficha técnica [120].</i>	48
<i>Figura 3.25. a) Amplificador de carga Kistler 5070A [51]; b) Tarjeta de adquisición de señales KEITHLEY KUSB-3100m.</i>	48
<i>Figura 3.26. a) Microscopio óptico modelo Optika SZR; b) Microscopio electrónico de barrido (SEM).</i>	49
<i>Figura 3.27 Geometrías de broca empleadas para el estudio de los parámetros de corte óptimos en relación al material compuesto de fibra de carbono.</i>	51
<i>Figura 3.28. Cuantificación del factor de delaminación.</i>	52
<i>Figura 3.29. Evolución de las fuerzas de corte y del par para las geometrías de broca analizadas en tejido. Avance 0.1 mm/rev y Velocidad de corte 100 m/min [2].</i>	53
<i>Figura 3.30. Variación de las fuerzas de corte frente al avance para la broca Brad(A), broca Reamer (C)y la broca Step (E);y el par frente al avance para la broca Brad (B), broca Reamer (D)y la broca Step (F) para tejido.</i>	55
<i>Figura 3.31. Factor de delaminación frente al avance para la broca Brad (A, B), la broca Step (E, F) y la broca de escariar (C, D) para el material en tejido.</i>	57
<i>Figura 3.32. Variación de las fuerzas de corte con el avance para la broca Brad (A), broca Reamer (C), y Step (E); y par frente a avance para la broca Brad (B), Reamer (D) y Step (F) para el material en cinta.</i>	59
<i>Figura 3.33. Factor de delaminación en función del avance para la broca Brad (A, B), Reamer (C, D) y Step (E, F), para el material en cinta.</i>	60
<i>Figura 3.34. Variación de las fuerzas de corte (a)) y de la delaminación de salida(b)) para la broca Brad. Velocidad de corte: 100 m/min.</i>	62
<i>Figura 3.35. Delaminación y otros defectos en material en cinta para las tres geometrías de broca(V=100 m/min, f=0.1 mm/rev).</i>	63
<i>Figura 3.36. Delaminación y otros defectos en material en tejido para las tres geometrías de broca(V=100 m/min, f=0.1 mm/rev).</i>	63
<i>Figura 3.37. Defectos relacionados con la calidad del taladro. (A) fraying; (B) chipping.</i>	64
<i>Figura 3.38. Brocas objeto de estudio. a)Broca helicoidal; b)Broca Brad.</i>	66
<i>Figura 3.39. Cuantificación del daño por Fuzzing.</i>	67
<i>Figura 3.40.Fuerzas de corte y par con respecto al avance para la broca helicoidal (A,B) y la broca Brad (C,D) para el material compuesto a base de aramida.</i>	69
<i>Figura 3.41. Fuzzing de entrada y de salida para las dos geometrías de broca.</i>	70

<i>Figura 3.42. Fuzzing de entrada (a);c)) y de salida (b);d)) para la broca helicoidal a velocidad de corte 40 m/min y avance 0.025 mm/rev (a);b)); velocidad de corte 110 m/min y avance 0.05 mm/rev (c);d)).</i>	71
<i>Figura 3.43. Fuzzing de entrada (a);c)) y de salida (b);d)) para la broca Brad a velocidad de corte 110 m/min y avance 0.025 mm/rev (a);b)); velocidad de corte 40 m/min y avance 0.05 mm/rev (c);d)).</i>	72
<i>Figura 3.44. Esquema del moldeo por compresión para la fabricación de los materiales compuestos [89].</i>	73
<i>Figura 3.45. Máquina Universal Servosis ME-404/100 + PCD-1065 empleada para la fabricación del material compuesto biodegradable.</i>	74
<i>Figura 3.46. Brocas objeto de estudio. a) Broca helicoidal; b) Broca especial.</i>	75
<i>Figura 3.47. Ejemplo del cálculo del Factor de daño (Fd), encontrado el Fraying como el mecanismo de daño principal. La imagen corresponde al material compuesto a partir de yute y 10361 PLA en 2 capas, taladrado con la broca a).</i>	76
<i>Figura 3.48. Factor de daño vs velocidad de corte para todos los materiales compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10). a) y b) daño a la entrada y salida obtenido con la broca A; c) y d) daño a la entrada y salida obtenido con la broca B.</i>	80
<i>Figura 3.49. Fuerzas de corte vs velocidad de corte para todos los compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10), a) broca A, b) broca B.</i>	81
<i>Figura 3.50. Factor de daño vs velocidad de avance para todos los materiales compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10). a) y b) daño a la entrada y salida obtenido con la broca A; c) y d) daño a la entrada y salida obtenido con la broca B.</i>	83
<i>Figura 3.51. Fuerzas de corte vs avance para todos los materiales compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10). a) broca A, b) broca B</i>	83
<i>Figura 3.52. Imagen SEM-EDS de la sección transversal del taladro (biocompuesto a base de lino (BF) y PLA 10361D en 2 capas), taladrado con la broca A a una velocidad de corte de 20 m/min y un avance de 0.03 mm/rev (a)) y 0.12 mm/rev (b)) respectivamente.</i>	84

<i>Figura 3.53. Calidad del taladro en términos de factor de daño en la salida, para el biocompuesto a base de lino (BF), taladrado con la broca A de diámetros 3, 5 y 6 mm.</i>	85
<i>Figura 3.54. Factor de daño vs número de capas para el compuesto BF/PLA10 y BC/PLA10. a) y b) daño a la entrada y salida obtenido con la broca A; c) y d) daño obtenido a la entrada y salida con la broca B.</i>	86
<i>Figura 3.55. Factor de daño a la entrada y la salida vs diámetro de la broca (broca A). Lino (BF) y algodón (BC) con PLA10 como matriz.</i>	87
<i>Figura 3.56. Daño inducido a la salida, obtenido con la broca A (2 capas, 20 m/min de velocidad de corte, 0.06 mm/rev de avance) en los cinco biocompuestos analizados: a) lino con PLA 3260HP (BF/PLA 3); b) lino con PLA 10361D (BF/PLA 3); c) lino de baja calidad (PF/PLA10); d) yute (PJ/PLA10); e) algodón (BC/PLA 10).</i>	88
<i>Figura 3.57. Imagen (SEM-EDS) de la sección transversal del taladro sobre biocompuesto de fibra de lino (BF) en 2 capas, taladrado con la broca A, a velocidad de corte de 20 m/min y avance de 0.12 mm/rev; con matriz de: a) PLA 10361D y b) PLA 3260HP.</i>	89
<i>Figura 4.58. Curvas tensión-deformación para el material compuesto de lino, a distintas velocidades de deformación [123].</i>	96
<i>Figura 4.59 Esquema del modelo reológico. La rama (a) describe la elasticidad no lineal, la rama</i>	97
<i>Figura 4.60 Curvas de tensión-deformación obtenidas para diferentes velocidades de deformación [123].</i>	100
<i>Figura 4.61 Descripción del ensayo de relajación. a) Curvas de deformación vs. tiempo; b) curvas de tensión vs tiempo [123].</i>	101
<i>Figura 4.62. Calibración de los parámetros del modelo para el material compuesto a base de Lino. a) Curva tensión-deformación; b) Ensayo de relajación viscoelástica; c) Ensayo de relajación viscoplástica [123].</i>	104
<i>Figura 4.63. Ensayos de tracción llevados a cabo sobre material compuesto a base de Lino, para velocidades de deformación de: a). $2.08 \times 10^{-3} s^{-1}$ y b) $8.33 \times 10^{-3} s^{-1}$. Comparativa entre resultados experimentales y predicciones del modelo.</i>	105
<i>Figura 4.64. Diagrama de flujo que representa el proceso llevado a cabo por la subrutina durante la eliminación de elementos.</i>	106

<i>Figura 4.65. a) Primera aproximación a la geometría de la pieza. Geometría descartada; b) placa inferior para la fijación y guiado durante el taladrado de la muestra.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4.66. Geometría de la placa definitiva. Diámetro 10 mm y espesor 1.4 mm (BF/PLA 10).</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.67. Diseño en Solid Edge ST9 de las distintas geometrías de broca para el material compuesto biodegradables. a) Geometría de Broca A; b) Geometría de Broca B.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.68. Geometrías de broca importadas al programa ABAQUS CAE. a) Geometría de Broca A; b) Geometría de Broca B.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.69. Condiciones de contorno fijadas para la placa y la broca en su modelización dentro del programa ABAQUS CAE. a) Placa de Lino; b) Broca A.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4.70. Mallado en ABAQUS CAE. a) material compuesto a base de lino (BF/PLA 10); b) Broca A.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4.71. Comparación del modelo numérico con el experimental para la Broca A durante el taladrado de material compuesto a base de lino (BF/PLA 10).</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4.72. Comparación del modelo numérico con el experimental para la Broca B durante el taladrado de material compuesto a base de lino (BF/PLA 10).</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.73. Cuantificación del F_d en la modelización del material compuesto a base de lino en ABAQUS CAE. Representado en Caso 3 con la geometría de broca A.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.74. Comparativa entre el Factor de daño obtenido para todos los casos planteados (Tabla 4.18) experimental y numéricamente con la Broca A. a) a la entrada; b) a la salida.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4.75. Análisis de la tendencia del F_d tanto a la entrada como a la salida con respecto al avance para la Broca A. Resultados experimentales y analíticos.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4.76. Comparativa entre el Factor de daño obtenido para todos los casos planteados (Tabla 4.18) experimental y numéricamente con la Broca B. a) a la entrada; b) a la salida.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 4.77. Análisis de la tendencia del F_d tanto a la entrada como a la salida con respecto al avance para la Broca B. Resultados experimentales y analíticos.</i>	<i>119</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1. Principales propiedades mecánicas de las matrices [9, 10, 11].</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2.2. Principales características de las fibras para material compuesto en comparación con el acero [9, 12-17].</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2.3 Principales parámetros de corte, espesor de muestra y geometrías de broca más comúnmente empleadas según la bibliografía [2].</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2.4. Principales parámetros de corte y brocas empleadas en las investigaciones previas.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 2.5. Principales parámetros de corte y brocas empleadas en las investigaciones previas sobre fibras naturales.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 3.6 Propiedades mecánicas para el material en cinta y en tejido, materiales objeto de estudio.</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 3.7 Condiciones de corte empleadas en los ensayos de taladrado de fibra de carbono.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 3.8 Propiedades mecánicas para el material de aramida.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 3.9 Condiciones de corte recomendadas para la realización de los ensayos.</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 3.10. Resistencia a tracción y Desviación obtenida para los materiales fabricados [15].</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 3.11 Propiedades mecánicas para el material de compuesto biodegradable.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 3.12. Factor de daño (Fd) a la entrada del taladro (peel up) y salida (push out) cuantificado en cada test para cada material con 2 capas y diámetro de broca 6mm.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 3.13. Factor de daño (Fd) a la entrada del taladro (peel up) y salida (push out) cuantificado en cada test para cada material con 3 capas y diámetro de broca 6mm.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 3.14. Factor de daño (Fd) a la entrada del taladro (peel up) y salida (push out) cuantificado en cada test para cada material con 4 capas.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4.15. Parámetros del modelo para el Lino.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 4.16. Comparación entre el estrés final experimental y el predicho en el ensayo de relajación viscoplástica ($\sigma_{\infty p}$).</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 4.17. Propiedades del material compuesto de lino, implementadas en ABAQUS CAE para la modelización del proceso de mecanizado.</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 4.18. Casos modelizados y parámetros característicos.</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 4.19. Medidas características para la creación de las distintas geometrías de broca en Solid Edge ST9.</i>	<i>109</i>

<i>Tabla 4.20. Comparativa de resultados de Fuerza de corte obtenidas experimental y analíticamente en las distintas condiciones analizadas para la Broca A.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 4.21. Comparativa de resultados de Fuerza de corte obtenidas experimental y analíticamente en las distintas condiciones analizadas para la Broca B.</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 5.22. Resumen de parámetros resultados óptimos para cada material procesado en la presente Tesis.</i>	<i>126</i>

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1.MARCO DE LA TESIS Y MOTIVACIÓN.

Los procesos de mecanizado son muy habituales en el sector industrial de fabricación mecánica. Esto se debe, entre otras razones, a su versatilidad en la obtención de geometrías y al nivel de precisión dimensional obtenido en comparación con otros procesos. El taladrado es especialmente importante dentro de este conjunto, ya que es un proceso muy utilizado y que frecuentemente se realiza al final del proceso de fabricación, por lo que un fallo puede representar cuantiosas pérdidas.

Los materiales compuestos poseen propiedades mecánicas que, si bien presentan ventajas para su puesta en servicio, los hacen difíciles de mecanizar: alta resistencia en relación a su peso, baja densidad, resistencia a la corrosión, aislante eléctrico, etc. Éstas características inducen desgaste en la herramienta durante el taladrado de fibra de carbono (CFRP) [1], y degradación en el material a consecuencia del proceso de

taladrado, en las familias de materiales compuestos objeto de éste trabajo (fibras de carbono, fibras de aramida y fibras naturales) [2,3].

Dentro de los materiales compuestos, aquellos reforzados con fibra de carbono son muy empleados en la industria aeronáutica debido a su elevada resistencia y rigidez específica, propiedad derivada del refuerzo de carbono. Además, su coeficiente de dilatación térmica longitudinal es prácticamente nulo, lo que permite emplearlo en estructuras que durante su funcionamiento se vean sometidas a altas variaciones de temperatura (-50°C a 40°C) muy habituales en aeronáutica. Por su parte, el Kevlar se emplea fundamentalmente en la industria militar, por sus usos como protección o blindaje, debido a su elevada capacidad de absorción de energía... Los materiales compuestos biodegradables, suponen una alternativa sostenible con propiedades interesantes para diversas aplicaciones.

Cabe destacar que las propiedades de los distintos materiales a analizar (carbono, aramida y fibras naturales) son muy distintas, por lo que su comportamiento mecánico y, por consiguiente, su comportamiento durante el taladrado también lo será. Por ello, su estudio se ha realizado de manera independiente en el presente trabajo.

En los últimos tiempos se han desarrollado modelos numéricos de los procesos de taladrado, los cuales, dependiendo del nivel de detalle, posibilitan predecir medidas de fuerza sobre la herramienta, y valores de par torsor. Los más simples, son modelos axilsimétricos procedentes de modelos tridimensionales simplificados, siendo aplicables para condiciones de corte muy específicas y con un coste computacional muy reducido. Los modelos 3D, por el contrario, aportan un modelo completo y aproximado a los procesos de taladrado reales, presentado como contrapartida, elevados tiempos de simulación y cálculo.

El mecanizado de éste tipo de materiales se realiza en ausencia de fluido de corte, principalmente por el detrimento de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos al entrar en contacto con fluidos. No emplear fluidos de corte, permite reducir el impacto medioambiental, así como los costes de fabricación (alrededor del 16-20% de los costes totales de fabricación se pueden atribuir al uso de éstos fluidos).

Evitar los defectos en el material producto de los procesos de mecanizado implica establecer ciertos criterios y parámetros de corte a fin de mitigarlos. Uno de los defectos más importantes en éstos materiales compuestos es la delaminación, que consiste en la separación de las láminas que lo forman por efecto de las distintas fuerzas a las que son sometidos durante su procesado.

Con objeto de aumentar el conocimiento del proceso de taladrado sobre los materiales compuestos, y en concreto sobre los compuestos a base de fibra de carbono, aramida y fibras naturales surge el presente trabajo. Se pretende pues, avanzar en el conocimiento desde el punto de vista experimental, optimizando el proceso de taladrado reduciendo el daño sobre el material. De igual forma, se busca implementar herramientas de predicción capaces de proporcionar información acerca de parámetros de corte, geometrías de broca, así como daños sobre el material.

Cabe destacar, que, aunque existen modelos de taladrado sobre material compuesto a base de fibra de carbono y aramida, la literatura existente en relación a dichos modelos desarrollados sobre fibras naturales es nula.

1.2.OBJETIVOS.

A raíz de lo anteriormente planteado se presentan una serie de objetivos de este trabajo de investigación, los cuales, se desarrollan a continuación:

Objetivo General:

- Mejorar el conocimiento acerca del proceso de taladrado sobre los tres materiales objeto de estudio planteados en el presente trabajo, a base de fibras de carbono, aramida y fibras naturales, optimizándolo con objeto de reducir el daño sobre el mismo.
- Así mismo, se pretende desarrollar herramientas predictivas que permitan simular el proceso de taladrado.

Objetivos Parciales:

- Establecer la relación y tendencia del daño con las condiciones de corte estudiadas. Establecimiento del tipo de daño dominante para cada material analizado (fibra de carbono, aramida y fibras naturales) observándose su dependencia con los parámetros de corte principales.
- Establecer los parámetros y condiciones de corte más adecuadas para cada material, así como los tipos de herramienta más adecuados para el taladrado de cada uno de ellos. Medida de las fuerzas de corte y par torsor en cada uno de los ensayos, para el mismo diámetro de broca.
- Desarrollar modelos tridimensionales de taladrado basados en el Método de Elementos Finitos (MEF). Los modelos planteados se centran en el material compuesto a base de fibras naturales, y en concreto, a base de lino, analizando distintas geometrías de broca y parámetros de corte.
- Validación posterior del modelo numérico de taladrado a partir de los datos obtenidos durante el estudio experimental del proceso de taladrado sobre el material compuesto a base de fibras de lino.

El trabajo realizado en esta tesis se inscribe entre las actividades de investigación desarrolladas por el grupo de investigación Fabricación y Diseño de Componentes Mecánicos y Biomecánicos (FABDIS), y ha recibido financiación de distintos proyectos competitivos.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

Este trabajo se ha estructurado en cinco capítulos:

En el primero se incluye una breve introducción, la motivación del desarrollo de la tesis, los objetivos a alcanzar y las contribuciones originales más relevantes.

En el segundo, se recoge el estado del arte, una introducción a los procesos de taladrado y a las fibras a analizar, así como un breve resumen de los modelos numéricos.

En el tercer capítulo se describe el trabajo experimental desarrollado, así como el análisis de los parámetros más influyentes en los procesos de taladrado.

El cuarto capítulo se centra en el desarrollo de distintos modelos numéricos desarrollados y en su aplicación al análisis de los fenómenos observados en relación con los defectos presentes en los materiales durante su mecanizado.

Por último, en el quinto capítulo se resumen las conclusiones de este trabajo de Tesis Doctoral, así como líneas de trabajo futuro.

1.4.CONTRIBUCIONES ORIGINALES

Las aportaciones originales obtenidas durante el desarrollo de los trabajos derivados de la realización de ésta tesis se pueden resumir a continuación:

- Estudio de los parámetros de corte y geometrías de broca más adecuadas para el taladrado de material compuesto a partir de fibras de carbono, para ambas configuraciones de material, tejido y cinta.
- Posterior análisis de las fuerzas de corte y par generados con las distintas configuraciones de broca y parámetros de corte planteados para los distintos materiales compuestos de fibra de carbono. Evolución del daño desarrollado en función de los parámetros de corte y geometrías de broca establecidos durante el proceso de taladrado.
- Estudio de los parámetros de corte y geometrías de broca óptimos para el taladrado de material compuesto a base de aramida.
- Análisis de las fuerzas de corte y par torsor generadas durante el mecanizado del material compuesto de aramida, en función de los distintos parámetros planteados.

Estudio de la influencia de los parámetros de corte y geometrías de la herramienta sobre el daño inducido en el material durante dicho proceso.

- Comparación del proceso de taladrado sobre distintos materiales compuestos 100% biodegradables, incluyendo distintas geometrías de broca, espesores de material y parámetros de corte. Cabe destacar que no se han encontrado estudios similares en la literatura actual.
- Estudio de las fuerzas de corte y par torsor durante el proceso de taladrado sobre materiales compuestos biodegradables, a partir de distintas fibras naturales, así como la influencia sobre dicho estudio de los distintos parámetros de corte y geometrías de broca planteados.
- Análisis del daño derivado del taladrado de distintos biocomposites en función de los parámetros de corte y geometrías de broca planteados.
- Desarrollo de un modelo numérico 3D de elementos finitos que permite simular el taladrado de material compuesto biodegradable a base de lino para distintas geometrías de broca y parámetros de corte. De igual forma, permite el estudio de las fuerzas de corte generadas, y el daño generado como consecuencia de dicho mecanizado.
- Este modelo permite encontrar una explicación física al fenómeno observado experimentalmente, según el cual, incrementos en el avance suponen una disminución del daño derivado del proceso de taladrado, tendencia contraria a la presente en el procesamiento de materiales compuestos tradicionales.

Fruto de éstas aportaciones y estudios se han desarrollado 6 artículos en revistas indexadas en JRC y 10 publicaciones en congresos.

CAPÍTULO 2: Estado del arte

2.1.PROCESOS DE TALADRADO

La fabricación mediante mecanizado supone la obtención de geometrías y dimensiones de las piezas a través de la eliminación de material (viruta), por medios mecánicos o con herramientas de filo. El mecanizado se fundamenta en la eliminación de material en su relación con la deformación plástica, generando una viruta cuya geometría dependerá de las propiedades del material procesado.

Dentro de los procesos de fabricación, el taladrado es uno de los procesos de mecanizado más comunes, basado en la obtención de agujeros pasantes o ciegos en las piezas mediante la eliminación de material y generación de viruta a través de una herramienta de corte (broca).

Los parámetros principales del taladrado son:

- Velocidad de corte (V_c): Velocidad relativa entre el filo de la herramienta y la pieza en la dirección del movimiento de corte, calculada en m/min a través de la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{\pi \times n \times D}{1000} \quad (2.1)$$

Donde:

n : Indica el régimen de giro del husillo principal en rpm.

D : Representa el diámetro de la broca en mm.

V_c : Es el valor de la velocidad de corte nominal en m/min.

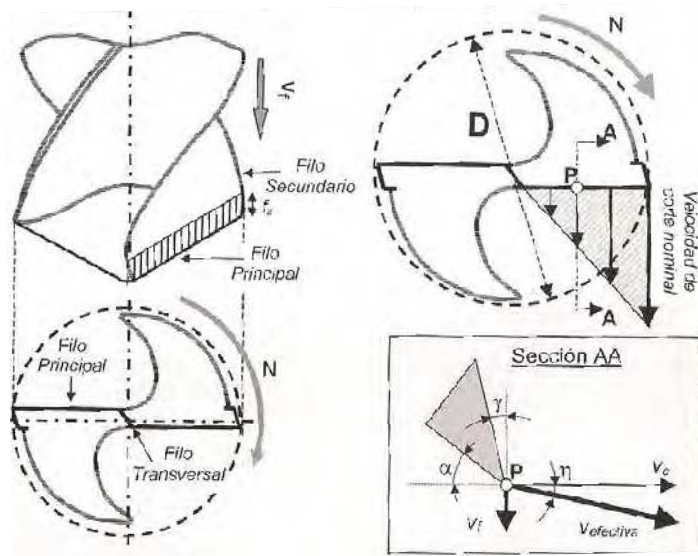


Figura 2.1. Evolución de la Velocidad de corte nominal en una broca helicoidal estándar [4].

En la Figura 2.1 se puede observar la distribución de la velocidad de corte nominal y su variación a lo largo del filo principal de la herramienta, siendo máxima en el encuentro entre el filo principal y el secundario y 0 en el centro geométrico de la herramienta.

- Avance (f): Es la distancia recorrida por la herramienta en cada revolución o carrera.

Actualmente hay una gran variedad de brocas cuya geometría y material depende fundamentalmente de la aplicación a la que vaya a estar destinada la misma,

encontrándose brocas helicoidales, enterizas, de plaquitas, refrigeradas, con recubrimiento, especiales (*Figura 2.2*).



Figura 2.2. Ejemplo de distintos tipos de brocas en el mercado [5].

Dentro de la geometría de la broca, y aun habiendo distintos tipos en función de su aplicación se encuentran elementos comunes (*Figura 2.3*):

- Filo Transversal: Es el filo en la punta de la broca, y que se caracteriza por una velocidad de corte nominal aproximadamente nula (*Figura 2.1*).
- Filo Principal: Es el filo de corte, se sitúa desde el filo transversal hasta el exterior de la broca, en el encuentro con el filo secundario. Sobre él se distribuye la velocidad de corte nominal (*Figura 2.1*).
- Filo secundario: Se distribuye a lo largo de la hélice de la broca. En contacto con las paredes del taladro durante el mecanizado.
- Ángulo de Punta (k_r): Ángulo formado por los filos principales, varía en función del material a taladrar.
- Ángulo de incidencia (α): Ángulo que forma la superficie del filo primario con el plano horizontal. Cuando es muy pequeño, el contacto con la superficie mecanizada aumenta, produciéndose una fricción elevada, lo cual se traduce en un aumento de la temperatura y en consecuencia un desgaste más rápido de la herramienta. Por el contrario, cuando el ángulo es demasiado grande el filo se debilita y puede llegar antes a rotura (*Figura 2.3*).

- Ángulo de desprendimiento (γ): Establece el ángulo de evacuación de la viruta con el plano vertical. Un ángulo grande facilita el corte del material, obteniendo un mejor acabado superficial, a consta de debilitar el filo. Por contra, un ángulo de desprendimiento pequeño incrementa la robustez de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento también es mayor. En general, será el menor que la herramienta pueda soportar sin romperse (*Figura 2.3*).

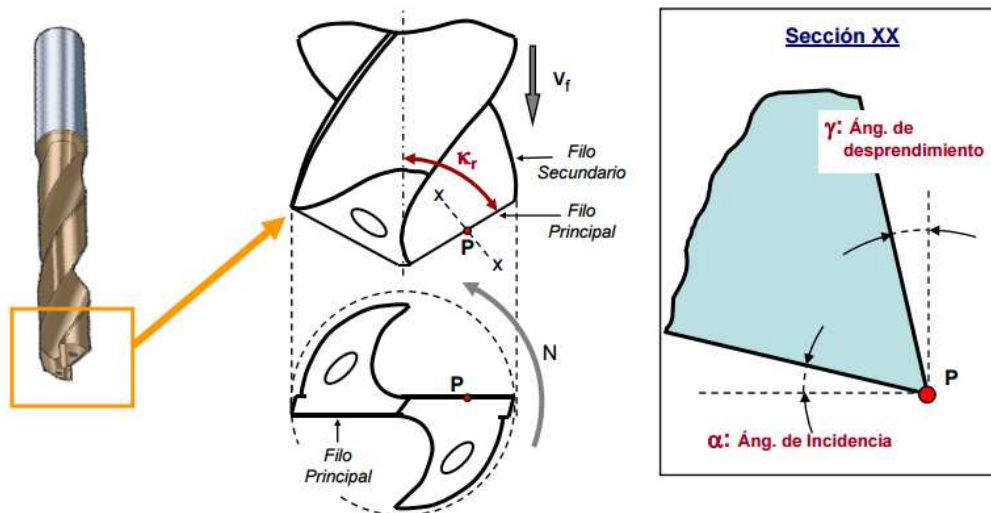


Figura 2.3. Ángulos y filos principales de la broca [6].

En el estudio de los procesos de mecanizado basados en la eliminación de material a través de la formación de virutas se distinguen dos métodos simplificados de estudio (*Figura 2.4*):

- Corte Ortogonal: el filo es perpendicular a la velocidad de la pieza con respecto a la herramienta siendo coincidente con la salida de la viruta.
- Corte Oblicuo: cuando el movimiento relativo entre la herramienta y pieza presenta un ángulo de inclinación.

A partir de éstos modelos básicos se pueden llevar a cabo comparaciones entre otros procesos de corte más complejos, permitiendo de éste modo utilizar las teorías desarrolladas para cada uno de dichos procesos.

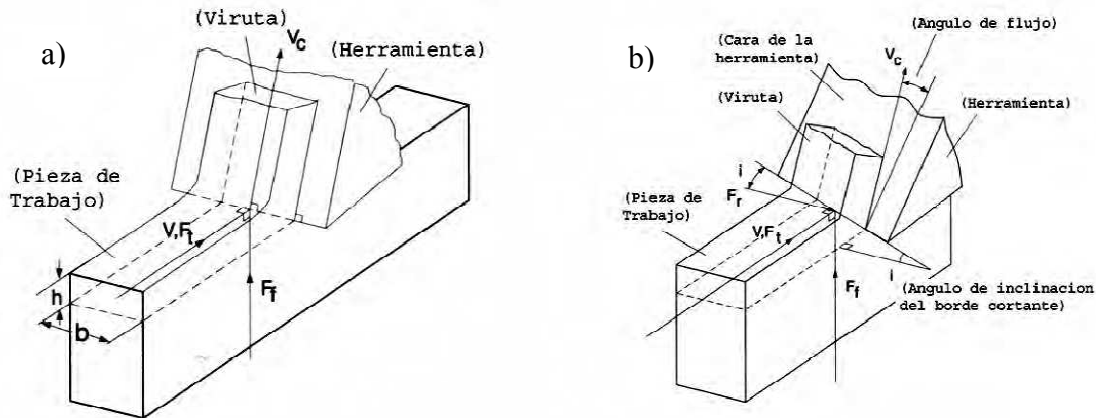


Figura 2.4. a) Corte ortogonal; b) Corte Oblicuo.

En la práctica no es muy común encontrar un corte puramente ortogonal, no obstante, el corte ortogonal es el más analizado en la literatura debido a su sencillez.

Las fuerzas de corte generadas durante el taladrado resultan de mucho interés, permitiendo analizar la formación de rebaba en materiales metálicos [7], así como la posible formación de delaminaciones en el taladrado de materiales compuestos [8]. Las fuerzas estimadas en el taladrado derivan generalmente de modelos de corte ortogonales/oblicuos, siendo costoso aplicarlo a otro tipo de procesos, fruto principalmente de la gran variabilidad de geometrías de herramienta.

2.2.MATERIALES COMPUESTOS

Se definen los materiales compuestos como la combinación de dos o más materiales formados a partir de una unión química o no química. Estos materiales que conforman el compuesto poseen propiedades superiores a las que presentan los componentes por si solos.

Los integrantes del material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales deben poderse identificar por medios físicos. El hecho de que los materiales compuestos sean heterogéneos implica que sean anisotrópicos (sus propiedades dependen de la orientación del material de refuerzo).

En todo material compuesto se distinguen dos componentes:

- La matriz: componente que se presenta en fase continua, actuando como ligante.
- El refuerzo, en fase dispersa, es el elemento resistente y se clasifican en función de su microestructura o geometría.

Los materiales compuestos se pueden clasificar atendiendo al tipo de matriz o al refuerzo:

- En función del tipo de matriz:
 - o Materiales compuestos de matriz metálica (MMC): se caracteriza por dar una mayor capacidad resistente al material compuesto junto a una buena rigidez y tenacidad a fractura, una anisotropía poco pronunciada y un buen comportamiento a altas temperaturas, aunque hay que tener en cuenta la posible reactividad entre la matriz y el refuerzo. Este tipo de matrices están limitadas por su alta densidad y su dificultad de procesado y mecanizado.

Existen tres tipos: aleaciones de aluminio, titanio y cobre. La elección del refuerzo depende del valor de la temperatura de fusión de la matriz.

- o Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC): ofrece una gran resistencia a esfuerzos mecánicos y altas temperaturas sin modificar su capacidad resistente. Por el contrario, su tenacidad es muy baja, al igual que sus conductividades térmica y eléctrica. Presentan altas resistencias a compresión, no así a tracción, por lo que lo más común es añadir fibras con alta resistencia a tracción. A veces, bajo niveles de carga tensionales capaces de romper la cerámica, se suelen utilizar refuerzos con un alto módulo de elasticidad, ya que la elongación de la matriz no es suficiente para transferir una significativa cantidad de carga al refuerzo.

Existen tres tipos: alúmina, carburo de silicio y nitruro de silicio. Como refuerzos, se suelen utilizar materiales cerámicos y metálicos.

- Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC): se caracteriza por su baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo coste, rapidez y sencillez de conformado. También hay que tener en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de matrices, la influencia que tienen las condiciones medioambientales sobre los polímeros, tales como humedad, temperatura y radiación.

Existen dos tipos de matrices poliméricas: termoestables y termoplásticas. Las termoestables se caracterizan por estar formadas por cadenas reticuladas que hacen que la estructura adquiera una disposición permanente, provocando que la reacción sea irreversible y el polímero no pueda reciclarse. Ejemplos de este tipo de polímeros son el poliéster, resinas epoxi, fenólicas, etc.

Por otro lado, las termoplásticas están formadas por moléculas unidas por fuerzas débiles, lo que les confiere la propiedad de reblandecerse y poder ser moldeadas por la acción del calor, endureciéndose al enfriar, siendo todo ello reversible. Algunos ejemplos son el polipropileno, poliamida, polietileno...

Tabla 2.1. Principales propiedades mecánicas de las matrices [9, 10, 11].

	Polímero	Densidad (g/cm³)	Temperatura de fusión (°C)	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo de Young (Gpa)	Deformación máxima (%)
Biodegradables	Almidón	1-1.39	110-115	5-6	0.125-0.85	31-44
	PLA	1.21-1.25	150-162	21-60	0.35-3.5	2.5-6
	PLLA	1.25-1.29	170-190	15.5-65.5	0.83-2.7	3-4
	PHB	1.18-1.26	168-182	24-40	3.5-4	5-8
	PHBV	1.23-1.35	144-172	20-25	0.5-1.5	17.5-25
	Chitosan	-	180-192	12-20	0.5-0.7	17-42
Tradicionales	PP	0.9-1.16	161-170	30-40	1.1-1.6	20-400
	PE	0.93	120-180	23	0.14-0.9	200-600
	PVC	1.1-1.45	100-260	9-59	3.4	17
	Polyester	1.19	220-267	57-60	1.93-3	-
	Epoxi	-	120-130	85	10.5	0.8

Suelen emplearse como refuerzo fibras de vidrio, carbono, boro...

En la *Tabla 2.1* se muestran las principales propiedades mecánicas de distintas matrices, biodegradables y tradicionales, las cuales han sido detalladas en la *Figura 2.5*, a fin de que sea posible una comparación de las mismas.

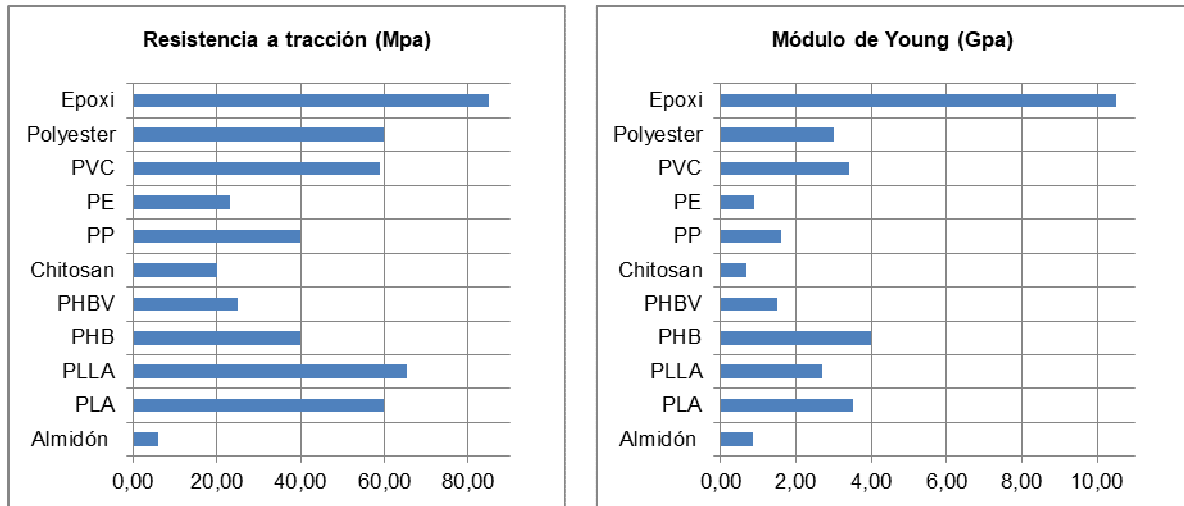


Figura 2.5. Representación gráfica de las propiedades mecánicas de las matrices.

- Basados en el criterio de la naturaleza de la microestructura de la fase dispersa (*Figura 2.6*):

- Compuestos reforzados con partículas: A su vez se dividen en materiales reforzados con partículas grandes y otros consolidados por dispersión. El material compuesto reforzado con partículas grandes más común es el hormigón. Las partículas son la arena o grava en una matriz cerámica compuesto por silicatos y aluminatos hidratados.

Las partículas pueden tener una gran variedad de geometrías, pero suelen tener aproximadamente las mismas dimensiones en todas las direcciones (equiaxiales), siendo esta la gran diferencia con las fibras. El refuerzo es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz. Las propiedades mecánicas mejoran con el contenido en partículas o lo que es lo mismo con el incremento de la relación partículas/matriz.

Dentro de éstos destacan también los compuestos metal-cerámica, cermet. El cermet más común es un carburo cementado, y dentro de este el WC o TiC, embebidos en una matriz metálica de cobalto o níquel. Tienen gran aplicación en materiales para herramientas de corte en acero endurecidos con carburos precipitados (cementados). Estas partículas extremadamente duras aportan el efecto de cortante a la superficie, pero son frágiles por lo que estos carburos por sí mismos no pueden soportar los grandes esfuerzos mecánicos en el corte.



Figura 2.6. Clasificación de los materiales compuestos en base a la microestructura de la fase dispersa.

- Compuestos reforzados con fibras: Son los materiales compuestos más conocidos por sus altas prestaciones mecánicas y el alto valor añadido del material final. La fase dispersa consta de fibras, lo cual es una microestructura muy anisotrópica, hilos o cilindros. Los materiales reforzados por fibras son los compuestos más importantes desde el punto de vista tecnológico. El objetivo es conseguir materiales con una elevada resistencia a la fatiga y rigidez, a bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad, por lo que se pretende conseguir una mejor relación resistencia-peso. Esta relación se consigue empleando materiales ligeros tanto en la matriz como en las fibras, siempre que estas cumplan con las propiedades mecánicas que se quieren otorgar al composite.

En la *Tabla 2.2* se muestran propiedades de distintas fibras, tanto naturales como procesadas industrialmente, comparadas con el acero.

Tabla 2.2. Principales características de las fibras para material compuesto en comparación con el acero [9, 12-17]

	Fibras / Material	Densidad (g/cm³)	Diámetro (μm)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young(GPa)	Deformación máxima (%)
Fibras Naturales	Lino	1.5	20-600	345-1500	27-65	2.7-3.2
	Cáñamo	1.47	25-250	550-900	38-70	1.6-4
	Yute	1.3-1.49	25-250	393-800	13-26.5	1.16-1.5
	Kenaf	1.5-1.6	2.6-4	350-930	40-53	1.6
	Ramie	1.5-1.6	0.049	400-938	61.4-128	1.2-3.8
	Sisal	1.45	50-200	468-700	9.4-22	3-7
	Curaua	1.4	7-10	500-1100	11.8-30	3.7-4.3
	Abacá	1.5	7-30	430-813	31.1-33.6	2.9
	Algodón	1.5-1.6	-	287-597	5.5-12.6	3-10
	Ortiga	-	-	650	38	1.7
	PALF	-	20-80	413-1627	24.5-82.5	1.6
	Banana	1.35	115-126	542-560	20	5-6
	Coco	1.15-1.46	100-460	131-220	4-6	15-40
	Bamboo	0.6-1.1	5-7	140-230	11-17	-
	Caña de azúcar	1.25	-	290	17	-
	Piña	0.7-1.55	-	400-627	1.44	14.5
	Palma	0.7-1.55	150-500	248	3.2	25
Sintéticas	Lyocell	-	11.4	1019.8	8.94	12.5
	Cordenka	-	12	830	20	13
	Vidrio (E- glass)	2.55	15-25	2000-3500	70-73	2.5-3.7
	Carbono	1.78	5-7	3400-4800	240-425	1.4-1.8
	Kevlar	1.44	-	3000	60	2.5-3.7
	Acero	7.85	-	215-830	210	10-30

Las matrices poliméricas para los materiales compuestos reforzados con fibras suelen ser plásticos termoestables del tipo resinas de poliéster insaturadas o resinas epoxi. Las primeras fueron las que se comenzaron a utilizar hace unos 40 años, son más baratas, fáciles de mecanizar y fáciles de curar a temperatura ambiente (aunque se pueden curar de forma acelerada a alta temperatura). Las resinas epoxi son ahora más comunes por las ventajas que presentan: mayor resistencia, menores modificaciones en la etapa de curado, mejor adherencia a las fibras, y se pueden utilizar a temperaturas más altas que las resinas de poliéster.

Las resinas epoxi son la base de los materiales compuestos basados en fibra de carbono o de poliamida.

Las propiedades mecánicas son generalmente anisotrópicas y varían mucho según el grado de ordenamiento de las fibras en el interior del material: ordenadas uniaxialmente, parcialmente ordenadas y desordenadas. Su resistencia difiere según la dirección en la que se aplica una fuerza respecto de la dirección de las fibras (*Figura 2.7*). Debido a ello, si se tira del material en la dirección de orientación de las fibras tendrá mucha resistencia, pero si se aplican fuerzas a 90° con respecto a la alineación de la fibra, la resistencia del compuesto dependerá casi exclusivamente de la matriz de resina la cual es relativamente débil.

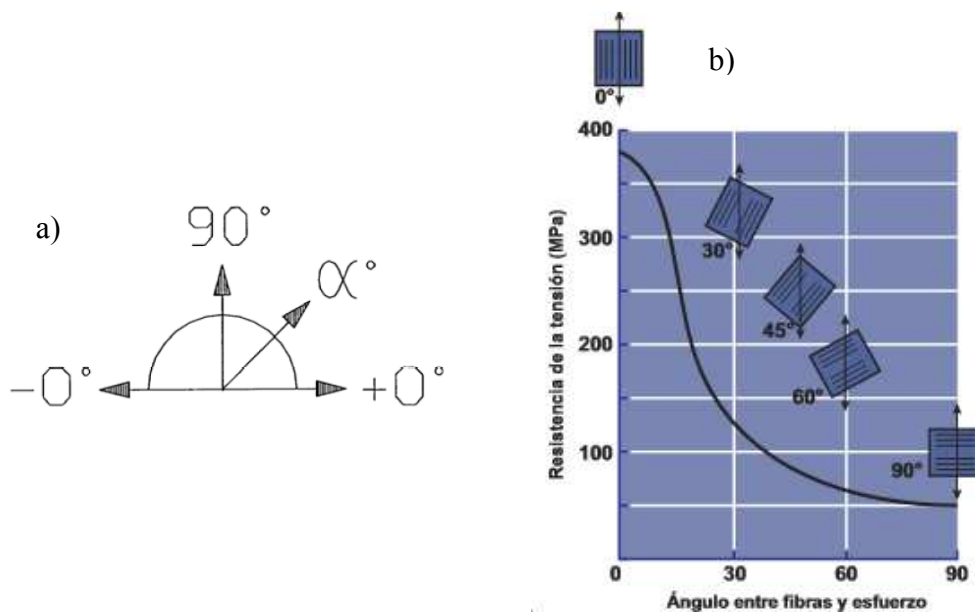


Figura 2.7. a) Nomenclatura relativa a la orientación de las fibras; b) Influencia de la orientación de las fibras sobre la resistencia a tracción (MPa) [18].

- Compuestos estructurales: Presentan una combinación de materiales homogéneos y las propiedades dependen más de la geometría del diseño de los elementos estructurales que de la naturaleza de los materiales constituyentes. Estas capas de materiales suelen ser laminares o sándwiches y son muy heterogéneos.

2.2.1. Fibras

Este apartado se centra en las fibras objeto de estudio en el presente trabajo, propiedades y principales características.

Fibra de Carbono:

Presenta muy alta resistencia y rigidez, por la estructura cristalográfica del grafito (*Figura 2.8*). Se distinguen los siguientes tipos:

- De módulo muy alto (para aplicaciones que requieran rigidez, 500 GPa de Módulo elástico)
- De módulo alto (400 GPa)
- De módulo intermedio (300 GPa)
- De alta resistencia (200 GPa)



Figura 2.8. Fibra de Carbono empleada como refuerzo.

Son muy útiles para aplicaciones donde los factores críticos son la rigidez, resistencia y bajo peso, pero donde el precio es un factor secundario (*Figura 2.9*).

Fibras / Material	Precio (USD/kilo)	Producción (ton)
Lino	0.4 – 3.5	1,602,047
Cáñamo	1.55	30,000
Yute	0.925	3,583,235
Kenaf	0.27	970,000
Ramie	2	100,000
Sisal	0.65	378,000
Caña de azúcar	0.48	1,832,541,194
Abacá	0.345	70,000
Algodón	1.9	25,000,000
Vidrio (E- glass)	2	-
Carbono	300	-
Kevlar	150	-
Acero	0.38	1,509,800,000

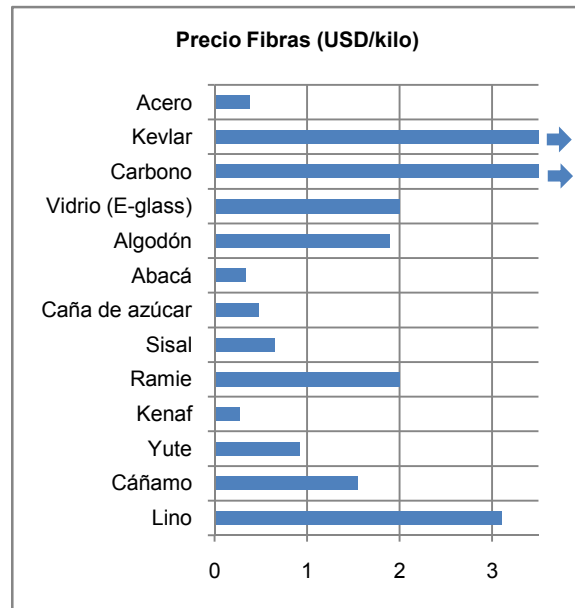


Figura 2.9. Precio de las principales fibras empleadas como refuerzo en la fabricación de materiales compuestos.

Es muy empleada en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones. Su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil. En general las fibras de carbono se obtienen a partir de las fibras de PAN (poliacrilonitrilo) en tres etapas:

- Estabilización: donde se estiran las fibras PAN y se oxidan a 200-220 °C mientras se mantiene la tensión.
- Carbonización: calentamiento a 1000-1500 °C en atmósfera inerte para eliminar H, O, N, proceso en el que se forman algunas fibras de grafito, pero no demasiadas.
- Grafitizado: calentamiento a $T > 1800$ °C para aumentar el módulo de elasticidad a expensas de disminuir un poco la resistencia a la tracción, en esta etapa se transforma casi todas las fibras a estructura grafito y aumentan su orientación.

Fibra de Polímeros:

La fibra de poliaramida es una de las más comunes y dentro de ellas el Kevlar49® y Kevlar29® son los nombres comerciales más conocidos, siendo introducidos por Du Pont en 1972 (*Figura 2.10*).



Figura 2.10. Fibra de Kevlar

El Kevlar 49, de baja densidad, alta resistencia y módulo elástico, se utiliza en aplicaciones aeroespaciales, marina, automoción y otras aplicaciones industriales. Por su parte, el Kevlar 29, se utiliza principalmente para aplicaciones balísticas, cables y cuerdas. Son muy tenaces y permiten la absorción de energía en impactos sin romperse.

El nomex® es otra fibra de poliaramida. Puede ser considerado como un Nylon, una variante del kevlar. Es vendido en forma de fibra y en forma de láminas y es utilizado donde quiera se necesite resistencia al calor y las llamas. Es mucho menos resistente, pero puede sufrir más deformaciones plásticas sin romperse. Este polímero se utiliza, por ejemplo, para trajes de bomberos y trajes espaciales.

El Kevlar, en combinación con Nomex, es utilizado en una gran gama de productos hoy en día. Entre ellos, es empleado para los chalecos y cascos antibalas, también en el desarrollo de cables ópticos, cordones para escalar, llantas, partes para aviones, canoas, raquetas de tenis y más.

Fibras Naturales:

Actualmente, hay una tendencia creciente a utilizar más materiales reforzados con fibras de menor precio e impacto medioambiental. Para ello se están reforzando muchos polímeros con fibras provenientes de productos naturales como el lino o la fibra de coco (*Figura 2.11*).



Figura 2.11. Fibras naturales (Lino)

Cada vez se utilizan más en la industria del automóvil donde según una directriz de la UE para el 2015 el 95 % de la masa de un coche debe ser reutilizable.

Su finalidad viene determinada por la necesidad de reducir los tiempos de descomposición de los materiales industriales o de hacerlos reciclables al fin de su vida útil. Esta necesidad se impone debido a la enorme cantidad de residuos contaminantes que se generan en el mundo, y cuya reducción exige la legislación con el fin de hacer sostenible el medio ambiente. Su composición no solo los define como biodegradables, sino que además son totalmente renovables, lo cual acrecienta la necesidad de su desarrollo. Por estos motivos, en los últimos años la expansión de estos compuestos ha sido rapidísima.

El hecho de que las fibras sean naturales y provenientes de plantas o árboles hace que los procesos para su obtención sean sumamente sencillos, tanto como lo es una plantación, su cosechado y su procesado para la obtención de fibras. Esto hace que el coste de las fibras sea muy reducido, gran ventaja respecto a los compuestos más tradicionales, en los que el elevado coste de la materia prima supone un grave inconveniente [19]. Por tanto, el hecho de desarrollar materiales biodegradables no sólo va ligado a un creciente respeto por el medio ambiente, sino que sus bajos costes lo sustentan como alternativa más que válida a muchos materiales actuales. Por ejemplo, para producir 1 kg de fibra de vidrio son necesarios 54 MJ, mientras que para la producción de 1kg de fibras de Kenaf, tan solo son necesarios 15 MJ [20]. En la *Figura 2.9* se pueden observar los costes y producción de algunas fibras comparado con otros materiales, comprobándose cómo las fibras naturales suponen un ahorro importante y sus volúmenes de producción hacen que su

obtención sea sencilla, tanto como lo es la del acero. Mención especial al Kenaf, planta muy común en la zona tropical asiática (Malasia), y cuyo precio es muy reducido dado que se obtiene en períodos de cultivo de 3 meses y creciendo más de 3 m [20]. Presenta casi 1000 Mpa de resistencia a tracción, motivos por los cuales es uno de los materiales más empleados en la investigación de materiales compuestos de fibras naturales [20,21,22]. En España se está tratando de cultivar el Kenaf, gracias a modificaciones para que su cultivo sea posible [23] fuera de las condiciones que se dan en su origen. El lino es la fibra natural más resistente (*Tabla 2.2*), aunque su elevado precio (*Figura 2.9*) supone un gran inconveniente.

Para conseguir un material compuesto natural, la matriz ha de serlo también, empleándose matrices que provienen de la polimerización, previa fermentación, de almidón de maíz, patata o trigo entre otros vegetales. El proceso de obtención de la matriz se puede simplificar a la polimerización de la harina, tal como se muestra en la *Figura 2.12*.



Figura 2.12. Polímeros vegetales

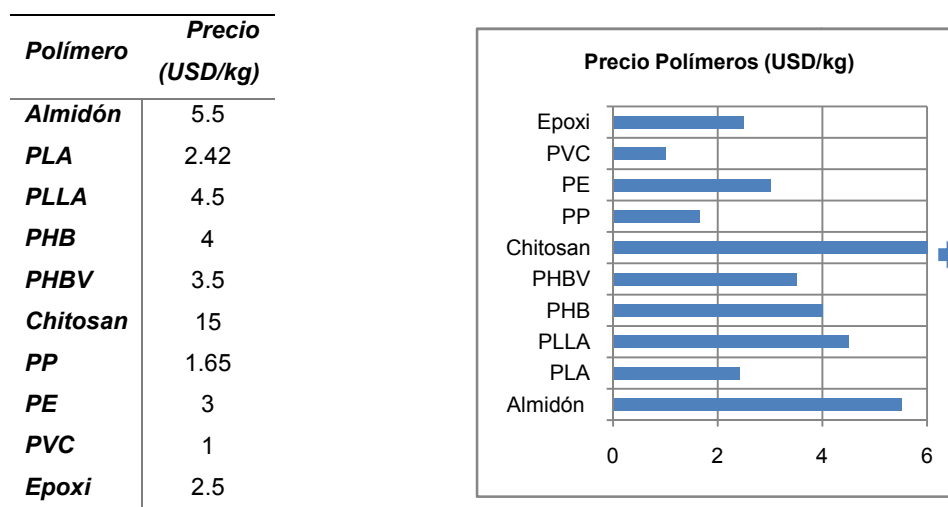


Figura 2.13. Precios de las principales matrices empleadas para la fabricación de materiales compuestos.

De la conjunción de ambos materiales extraídos de la naturaleza, tanto las fibras como la matriz, se obtiene un material compuesto biodegradable, que ya fue concebido en la década de los 90 por Bledzki y sus colaboradores [24].

En la *Figura 2.13* se presentan los precios de las matrices, de modo que sea posible comparar no sólo las características, ya mostradas en la *Figura 2.5*, sino también sus costes.

2.2.2. Principales defectos durante el taladrado

Delaminación:

La delaminación es un fenómeno de fallo intralaminar debido principalmente a la fuerza de avance en la operación de taladrado (*Figura 2.14*).

Es uno de los defectos más importantes y más comúnmente presente durante el taladrado de materiales compuestos laminados debido a que no solo afecta a la tolerancia de ensamblado y su capacidad portante, sino que también potencia el deterioro de la estructura en servicio a largo plazo bajo cargas [25, 26, 27].



Figura 2.14. Imagen SEM de fallo por delaminación sobre material compuesto [28].

Según numerosos autores, la delaminación inducida durante el taladrado se produce en la periferia del orificio del taladro tanto en la entrada (Peel up) como en la salida (Push out) del mismo [28, 30, 31, 32, 33, 34].

Cuando los filos de corte de la broca hacen contacto con el material compuesto, aparece una fuerza de corte a través de la pendiente de los canales de la broca que tira del material hacia arriba. Es entonces cuando se produce la separación de las capas entre si y se genera la delaminación (Peel up) alrededor de la zona de entrada de la broca (*Figura 2.15*).

La delaminación (Push out) se produce en la cara de salida, también en la periferia del agujero (*Figura 2.15*). Cuando la broca se acerca al lado de la salida del taladro, las capas sin cortar por debajo de la punta de la broca se hacen más susceptibles a la deformación debido a la disminución del espesor. La delaminación (Push out) aparece si la fuerza de empuje aplicada a las capas sin cortar excede la resistencia de unión entre las mismas. En la práctica, se ha encontrado que la delaminación asociada con el Push out es más severa que la asociada con el Peel up [35,36,37]. Es por ello que generalmente los estudios anteriores prestan más atención a este segundo fenómeno que al primero.

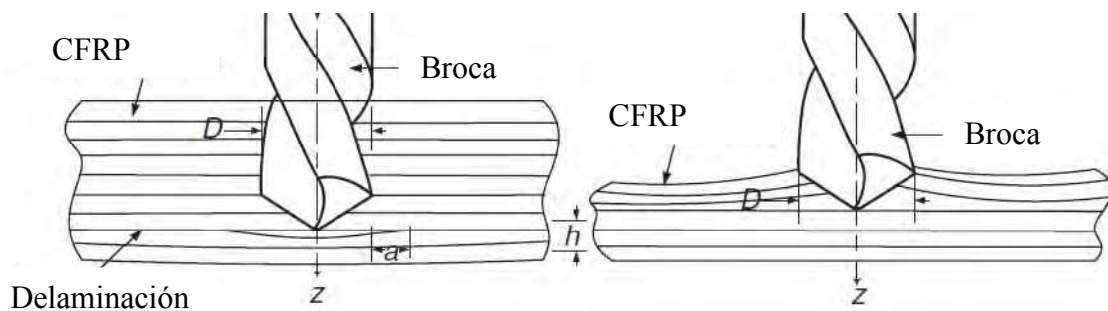


Figura 2.15. a) Delaminación de salida; b) Delaminación de entrada.

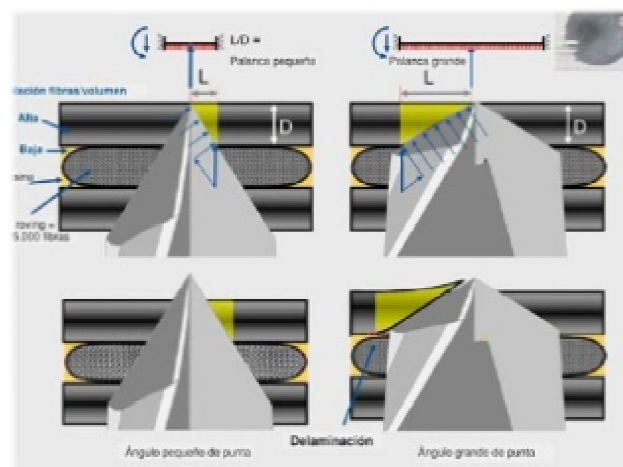


Figura 2.16. Influencia del ángulo de punta sobre la delaminación.

La delaminación está muy relacionada con la geometría de la broca, siendo uno de los parámetros más restrictivos de la misma el ángulo de punta. Cuanto menor sea este, menos interacción habrá entre la herramienta y la lámina de material compuesto a taladrar, y, por lo tanto, menos superficie a delaminar. Por el contrario, cuanto mayor sea el ángulo de punta de la herramienta mayor superficie de contacto y por ende mayor delaminación (*Figura 2.16*).

Existen varios métodos para evaluar el nivel de delaminación alrededor del taladro. El primero es el factor de delaminación unidimensional (F_d). Se define como la relación entre el diámetro máximo (D_{max}) de la zona delaminada y el diámetro (D_{nom}) del orificio perforado (*Figura 2.17*). La *Ecuación 2.2* recoge la expresión:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (2.2)$$

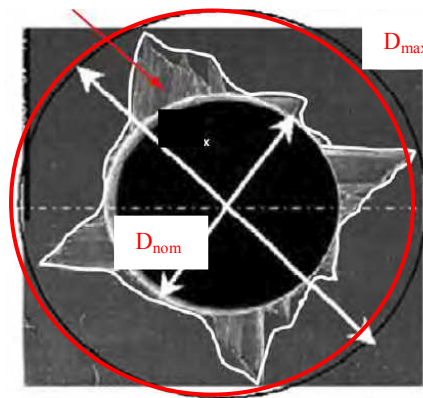


Figura 2.17. Medida del daño mediante el factor de delaminación unidimensional [2].

El criterio basado en el factor de delaminación unidimensional puede presentar, sin embargo, una incoherencia inherente; se puede obtener el mismo valor de delaminación en dos casos en los que la extensión diametral de la zona dañada sea la misma, pero con anchuras significativas distintas. Debido a ello, el factor no representara la zona real afectada [38]. Para representar el nivel de daño por delaminación en estas condiciones, puede ser más razonable emplear el factor de delaminación bidimensional (F_a) según la *Ecuación 2.3*, en la cual A_{del} es el área delaminada y A_{nom} es el área nominal del taladro (*Figura 2.17*) [38].

$$F_a = \left(\frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}} \right) \% \quad (2.3)$$

Existen diferentes exámenes no destructivos comúnmente empleados para cuantificar el daño inducido por la delaminación en el taladrado de materiales compuestos laminados. Entre estas metodologías se encuentran la microscopía óptica [31, 39, 40], ultrasonidos C-scan [33, 41, 42]...

Fuzzing:

El fuzzing es un mecanismo de fallo asociado al taladrado y que normalmente aparece junto a la delaminación durante el procesamiento de los materiales compuestos [43, 44, 45].

Generalmente es producto de una geometría no adecuada de la broca, que hace que las fibras próximas al perímetro del taladro no se corten durante el paso de la misma a través del material compuesto. Esto genera un área de fibras sin cortar en todo el contorno del taladro más o menos marcado en función de la geometría de la broca (*Figura 2.18*).

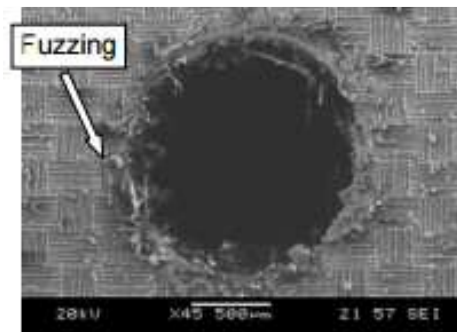


Figura 2.18. Imagen SEM de la presencia de Fuzzing durante el taladrado de material compuesto.

Genera problemas de resistencia en la zona afectada, así como dificultades para su posterior unión como elemento estructural, siendo necesario emplear filos de herramienta muy marcados y velocidades de corte relativamente altas, especialmente durante el taladrado de aramida [46, 47].

2.3.EL TALADRADO DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRAS DE CARBONO, ARAMIDA Y NATURALES.

2.3.1. Fibra de carbono.

Los compuestos poliméricos a base de fibras son empleados ampliamente en la industria para desarrollar estructuras de bajo peso debido a sus propiedades, principalmente elevada relación resistencia-peso, alta tenacidad a la fractura y resistencia a la corrosión [48].



Aunque los CFRPs se fabrican con una forma muy cercana a la definitiva o de puesta en servicio, suelen ser necesarias operaciones de mecanizado posteriores. Dentro de éstas se encuentra el fresado, habiéndose desarrollado herramientas específicas para dicha operación [49,50]. Sin embargo, es el taladrado la operación de mecanizado por excelencia, fruto de la necesidad de unión de distintas planchas de material compuesto para componentes de alta responsabilidad expuestos a cargas termo-mecánicas durante la vida útil [51].

La integridad superficial se debe asegurar, evitando daños que puedan derivar en una disminución de la vida de servicio. Dentro de estos daños la delaminación es uno de los más importantes durante el mecanizado de los CFRPs [52]. El análisis del taladrado es un campo activo de investigación debido al gran valor de dicha operación para la industria: se realiza en componentes de gran valor, por lo que el coste de rechazo de la pieza debido a una mala ejecución es también alto [53,54].

Aunque algunos modelos numéricos han sido capaces de predecir la calidad del taladro [55], la mayor parte de los análisis están basados en análisis experimentales, debido principalmente a la dificultad que presenta el modelado del proceso de taladrado. El taladrado es un proceso complejo donde la calidad del taladro depende fundamentalmente de los parámetros de corte, la geometría de la broca, así como la vida de la herramienta [56].

En la *Tabla 2.3* se han resumido las geometrías, parámetros de corte y las principales características de los materiales empleados durante los ensayos experimentales de diversas investigaciones.

Tabla 2.3 Principales parámetros de corte, espesor de muestra y geometrías de broca más comúnmente empleadas según la bibliografía [2]

Geometría de la Broca	Tipo de CFRP	Referencias	Parámetros de corte
Broca Helicoidal [57]. 	Cinta	Durao et al. [30]	Espesor: 4 mm; Diámetro: 6 mm; Avance: 0.02, 0.06, 0.12 mm/rev; Velocidad de Corte: 53 m/min; Recubrimiento: Sin.
		Shyha et al. [58]	Espesor: 3 mm; Diámetro: 1.5 mm; Avance: 0.1, 0.2 mm/rev; Velocidad de Corte: 15, 45 m/min; Recubrimiento: Sin y Recubrimiento TiN.
		Xu et al. [59]	Espesor: 2.6 mm; Diámetro: 4.9 mm; Avance: 0.002-0.018 mm/rev; Velocidad de Corte: 31-154m/min; Recubrimiento:PCD.
		Marques et al. [60]	Espesor: 4mm; Diámetro: 6 mm; Avance: 0.01, 0.025, 0.05 mm/rev; Velocidad de Corte: 30–102 m/min; Recubrimiento: Sin y Recubrimiento K20.
		Piquet et al. [61]	Espesor: 2.8 y 3.36mm. Diámetro: 4.8 mm; Avance: 0.05, 0.125 y 0.2 mm/rev; Velocidad de Corte: 48 m/min; Recubrimiento: Sin.
	Tejido	Davim et al. [31]	Espesor: 3 mm; Diámetro: 5 mm; Avance: 0.05-0.2 mm/rev; Velocidad de Corte: 30-50 m/min; Recubrimiento: Sin.
		Grillo et al. [62]	Espesor: 3 mm; Diámetro: 5 mm; Avance: 0.05-0.3mm/rev; Velocidad de Corte: 35-106 m/min; Recubrimiento: Sin
		Hocheng et al. [42]	Espesor: 6 mm; Diámetro: 10 mm; Avance: 0.003-0.0133 mm/rev; Velocidad de Corte: 900, 1000 rpm; Recubrimiento: Sin.
		Lazar et al. [57]	Espesor: 10 mm; Diámetro: 5.6 mm; Avance: 0.02-0.2 mm/rev; Velocidad de Corte: 9- 88 m/min; Recubrimiento: Sin.
Broca Brad [48]. 	Cinta	Durao et al. [30]	Espesor: 4mm; Diámetro: 6 mm; Avance: 0.02, 0.06, 0.12 mm/rev; Velocidad de Corte: 53 m/min; Recubrimiento: Sin.
		Marques et al. [60]	Espesor: 4mm; Diámetro: 6 mm; Avance: 0.01, 0.025, 0.05 mm/rev; Velocidad de Corte: 30-102 m/min; Recubrimiento: Sin y Recubrimiento K20.

[illegible]

En lo relativo al apilado de láminas unidireccionales, Durao et al. [30] analizaron la influencia de la geometría de la broca durante el taladrado de CFRPs en cinta. Los autores desarrollaron un estudio comparando cinco geometrías de broca distintas (broca helicoidal de 120° y 85° de ángulo de punta, tipo Brad, tipo Dagger y una broca Step) cuando se taladra material compuesto de fibras cruzadas. Los resultados mostraron que la broca helicoidal y la broca Step no generaron cambios relevantes en la delaminación con incrementos en el avance. Por el contrario, si se mostraron cambios relevantes durante el uso de las brocas Brad y Dagger. El ángulo de punta de 120° en la broca helicoidal está recomendado para altos valores de avance indicando como una posible alternativa la broca Step.

Shyha et al. [58] analizaron la influencia del ángulo de punta y de hélice en brocas de carburo cementado para mecanizar pequeños agujeros. Se emplearon dos brocas con recubrimiento TiN y sin recubrir: una broca Step y helicoidal. Con un criterio de un desgaste de flanco máximo de 100 mm, para una broca Step sin recubrimiento y un avance alto aumenta la vida de la herramienta. La reducción de las fuerzas de avance se atribuyó a la escasa interacción entre la arista de corte y la pieza cuando se emplea la geometría de broca Step. De igual forma, un avance alto reduce el tiempo de contacto entre la herramienta de corte y la pieza debido a una reducción del área abrasiva.

Xu et al. [59] analizaron el efecto durante el taladrado de material compuesto T800S/250F carbono/ epoxy mediante una broca helicoidal estándar y una broca Dagger con geometría especial y recubrimiento PCD. La resistencia y el módulo de tracción de la fibra T800S aumentaron un 67% y 28 % respectivamente cuando se compara con la fibra T300, resultando en una peor maquinabilidad durante el proceso de taladrado. Las brocas empleadas para éste estudio mostraron fallos y roturas en el recubrimiento, así como defectos en el filo de corte, debido principalmente al empleo de fibras especiales con alta resistencia. El daño por delaminación se redujo en caso de la broca para escariado con recubrimiento PCD en comparación con la broca helicoidal debido a las múltiples aristas de corte involucradas durante el taladrado, y que dotan a las paredes del taladro de un mejor acabado.

Marques et al. [60] compararon una broca Step especial con una sección de paso pequeña (1,25 mm), con el objetivo de crear un agujero guía con una broca Dagger, una broca

Brad y una broca helicoidal convencional. Se comprobó que las geometrías de broca seleccionadas en combinación con una velocidad de corte conservadora, un avance bajo y en un agujero guía reducen el riesgo de aparición de la delaminación.

Piquet et al. [61] compararon una broca para escariado con tres filos de corte con una broca helicoidal convencional. Recomienda realizar un taladro previo con objeto de neutralizar el efecto de la arista de corte en el caso de la broca helicoidal. Sin embargo, aplicando un avance variable a la broca para escariado en relación a su geometría, se produce una reducción significativa de los defectos sin necesidad de realizar un taladro previo.

Karpat et al. [65] han llevado a cabo recientemente un estudio sobre el taladrado de material compuesto multidireccional CFRP con brocas de doble ángulo de punta y recubrimiento PCD. En dicho estudio, se plantea un modelo con objeto de analizar el efecto de la geometría de la broca (filo de corte primario y secundario y ángulo de corte) así como de los parámetros de corte. De igual forma, se estimaron las fuerzas de corte y el par según la orientación de las capas en el material compuesto.

El material compuesto CFRP en tejido presenta ciertas ventajas cuando se compara con el mismo en cinta, siendo ambos, ampliamente usados en los distintos sectores industriales. La configuración de las capas en el tejido tiene una importancia significativa sobre las propiedades mecánicas del compuesto (*Figura 2.7*). Davim y Reis [31] llevaron a cabo uno de los estudios más recientes sobre el taladrado de material compuesto en tejido. Emplearon dos brocas, una helicoidal y otra Brad, con objeto de analizar la correlación entre los parámetros de corte y la delaminación. Se constató una fuerte influencia del avance sobre la delaminación de entrada para ambas geometrías. De igual forma, se pudo comprobar que se originaba menos delaminación para la broca Brad en comparación con la helicoidal.

Shyla et al. [35] emplearon brocas Step de carburo de tungsteno (WC) como recubrimiento para mecanizar taladros de pequeño diámetro en compuestos de CFRP en tejido. La mayor parte de los taladros a velocidades de avance elevadas (0,4 mm/rev) experimentaron un fallo catastrófico. El fallo de la broca se produce a partir de un avance de 0,2 mm/rev, siendo recomendado éste avance como el máximo para dicha geometría.

La broca especial Step-Core ha sido estudiada por Tsao [41]. Éste tipo de broca presenta una geometría interna convencional y una externa que produce un rectificado sobre la superficie de la pared del taladro. En éste estudio, la parte externa representa el diámetro nominal y la parte interna es broca helicoidal, Saw y Candlestick respectivamente. Se concluyó que la relación de diámetros (relación entre el diámetro interno y externo) y el avance es el parámetro más influyente sobre las fuerzas de corte. Dicha fuerza aumenta al incrementarse el avance y decrecer la relación de diámetros. De igual forma, se probó que la combinación de un diámetro grande, un avance bajo y una velocidad de corte elevada minimizaba el efecto de la delaminación. Tsao y Chiu [66] compararon en otro estudio, brocas Step y no Step-core, introduciendo un movimiento relativo entre las partes interna y externa de las mismas. Los resultados experimentales demostraron que la velocidad de corte, el avance y la geometría de la parte interna de la broca fueron las variables más importantes en cuanto a influencia se refiere, sobre la fuerza de corte. Recomiendan la combinación de un movimiento relativo negativo y un avance pequeño para reducir la delaminación.

Hocheng y Tsao [42] llevaron a cabo experimentos sobre CFRPs en tejido con un gran espesor empleando brocas especiales: broca helicoidal, broca Saw, broca Candle stick, broca Core y broca Step. La delaminación a la salida del taladro se redujo al emplear un ángulo de corte pequeño, debido a ello, las brocas Saw y Core dieron los mejores resultados.

Lazar y Xirouchakis [57] desarrollaron unos ensayos experimentales sobre material compuesto en tejido de fibra de carbono, así como de fibra de vidrio empleando tres geometrías de broca diferentes: broca Tapered, de 8 caras planas y 2 caras planas. El diámetro del taladro varía levemente con cada geometría, pero es siempre cercano y menor a 6 mm. La maquinabilidad es comparable para ambos materiales, a pesar de las mejores propiedades mecánicas de los CFRPs. Las cargas más grandes se encontraron en la punta de la broca cerca del filo de corte en ambos casos. De igual forma, encontraron que la máxima carga por lámina variaba con el avance y la geometría de la broca, mientras que la velocidad de corte no mostró una influencia significativa.

En un estudio similar desarrollado por Grillo et al. [62], se compararon una broca Spur, una helicoidal con un ángulo de punta de 140° y una broca de cuatro caras planas. La

geometría Spur se presenta como la mejor opción cuando se compara con la broca helicoidal y la broca de cuatro caras planas. La delaminación es despreciable en ambas caras del taladro para dicha broca, trabajando a una velocidad de corte de 106 m/min y un avance de 0.3mm/rev. Por el contrario, a velocidades de corte superiores la delaminación en la entrada parece mayoritaria en comparación con la de salida.

Murphy et al. [67] estudiaron brocas de carburo de tungsteno (WC) revestidas con nitruro de titanio (TiN) y carbono como diamante (DLC) durante el taladrado de material compuesto CFRP en tejido. La fuerza de corte y el par aumentan con la evolución del tiempo de corte como consecuencia del aumento del desgaste de flanco. Éste desgaste aumenta significativamente durante los estados iniciales de la vida de la herramienta (aproximadamente tras la ejecución de 7 taladros), después la progresión del desgaste es más lenta. Este fenómeno es debido a la transición entre la zona primaria y secundaria de desgaste, un patrón típico del taladrado de materiales metálicos [68]. La progresión del desgaste influye sobre la fuerza de corte y el par en una forma similar: estas variables muestran grandes incrementos en la zona primaria de desgaste en comparación con la zona secundaria. La progresión del desgaste produce daño en la fibra en la zona de salida del taladro, así como "spalling" (*Figura 2.19*).

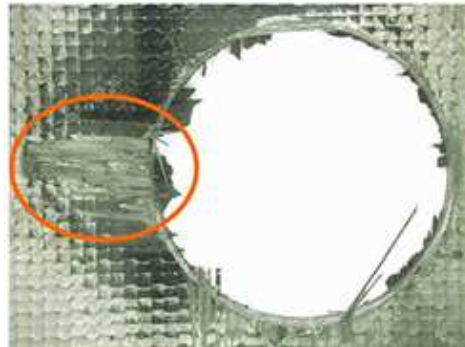


Figura 2.19. Defecto de "spalling" en el taladrado de materiales compuestos.

El daño inducido durante el taladrado se encontró similar para todos los tipos de recubrimiento empleados en el estudio, además, el uso de recubrimientos no aportó una mejora significativa frente al mismo.

Ramirez et al. [69] y Mondelin et al. [70] identificaron la abrasión como el principal mecanismo de desgaste durante el taladrado de CFRPs en tejido. Constataron la

influencia del desgaste de la herramienta sobre las fuerzas de corte y el par, y en consecuencia sobre la calidad del taladro.

El efecto del desgaste de la herramienta sobre las fuerzas de corte ya fue analizado previamente en otro estudio [2]. Se emplearon dos geometrías de brocas distintas, sin recubrimiento y desgastada, así como tres ángulos de punta distintos con objeto de taladrar CFRP en tejido. Constataron una escasa influencia del ángulo de punta sobre las fuerzas de corte durante el taladrado con brocas nuevas. Por el contrario, el ángulo de punta sí influía cuando se combinaba con un desgaste progresivo sobre la herramienta. De éste hecho deriva la importancia de la elección de la geometría de la broca y su posible desgaste, debido a la influencia de éste sobre valores excesivos de fuerza de corte. El efecto de la progresión del desgaste sobre la delaminación fue diferente a la entrada y salida del taladro mientras que la delaminación a la entrada decreció con la progresión del desgaste, la delaminación a la salida aumentó. Los mejores resultados en lo que a delaminación se refiere se obtuvieron con el menor valor del ángulo de punta: el factor de delaminación tanto a la entrada como a la salida aumentó con el ángulo de punta de la broca.

No sólo es importante el daño mecánico durante el taladrado de materiales compuestos CFRPs, otro de los mecanismos de especial relevancia es la temperatura en la pieza, la cual, también puede afectar a la calidad del componente y su medida durante el proceso de mecanizado es complicado. Hay varios estudios centrados en la temperatura y en el efecto de la misma sobre el taladrado de CFRPs [71, 72].

2.3.2. Fibra de aramida.

Hoy en día, el aumento en el terrorismo, conflictos civiles e internacionales hacen que el número de personas afectadas por daños celebrables (TBI) fruto de dichos conflictos esté aumentando drásticamente. Debido a ello, el rol de las protecciones personales está cobrando un papel importante a la hora de minimizar las heridas, traumatismos y muerte resultante de un impacto balístico en la cabeza. En ésta línea, se están desarrollando e implementando los cascos de combate como protección frente a la penetración de proyectiles de alto impacto. De igual forma, los daños en la cabeza están relacionados

con exposiciones a explosiones y amenazas balísticas y, por lo tanto, se hace necesario el equipamiento de protecciones auxiliares como viseras o protecciones de mandíbula (*Figura 2.20*) [73].



Figura 2.20. Casco de Combate con visera y protección de mandíbula.




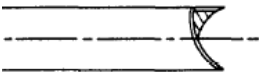
Las uniones mecánicas de estas protecciones auxiliares con el casco de combate es un proceso crítico y común para los fabricantes debido a que conlleva una reducción significativa de la resistencia a la penetración en la zona de unión. La operación de mecanizado más común empleada en relación con la realización de las uniones de los distintos componentes es el taladrado.


Los cascos de combate se fabrican habitualmente con materiales compuestos a base de aramida debido a sus excelentes propiedades, alta resistencia al impacto, y una elevada relación de resistencia frente al peso. Sin embargo, los materiales compuestos de aramida se delaminan fácilmente durante el mecanizado [74]. Entre los daños causados por el taladrado, se puede destacar la delaminación y el "fuzzing" como los principales defectos observados, así como "fraying", aunque en menor medida, siendo predominante a la salida del taladro [74].

De igual forma, ya que las condiciones de operatividad de los cascos de combate dependerán del nivel de seguridad necesario en función del tipo de conflicto al que el individuo a proteger se vea expuesto, será necesario o no el uso de los elementos auxiliares (visera y protector de mandíbula). La geometría de la broca, así como los parámetros de corte adecuados para el taladrado del material de aramida no ha sido suficientemente analizada en la literatura. La mayor parte de las investigaciones datan de los años 90 (*Tabla 2.4*) [74, 75, 76, 77].

Con una industria aeronáutica centrada en la reducción de costes de mantenimiento y de operación, y encaminada desde sus inicios a la reducción de peso y aumento de prestaciones, así como alcance/tiempo de vuelo, las piezas fabricadas con materiales compuestos representan cada vez un mayor porcentaje del total de componentes del avión (piso e interiores de la cabina, caja central de las alas y superficies de control, neumáticos, etc.). En la industria aeronáutica, el taladrado de este tipo de materiales compuestos se realiza apilándolos primero, para después taladrarlos simultáneamente, obteniendo mediante esta técnica una reducción en los costes de producción y el consumo de energía.

Tabla 2.4. Principales parámetros de corte y brocas empleadas en las investigaciones previas.

Geometría de la Broca	Referencias	Parámetros de corte
Broca Helicoidal [58]. 	Mufarrih et al. [78] Shuaib et al. [79] Bishop et al. [74] Bhattacharyya et al. [77] Won et al. [80]	Espesor: 6 mm; Diámetro: 10 mm; Avance: 0.1-0.3mm/rev; Velocidad de Corte: 47.1, 62.8, 78.5 m/min; Recubrimiento: Sin y Cobalto. Espesor: 2.4-16.4 mm; Diámetro: 6 mm; Avance: 0.1, 0.025 mm/rev; Velocidad de Corte: 23-57 m/min; Recubrimiento: TiN. Diámetro: 12.5 mm; Avance: 0.05-0.09 mm/rev; Velocidad de Corte: 19.4, 50.5 m/min; Recubrimiento: Sin. Espesor: 6mm; Diámetro: 10 mm; Avance: 0.1 mm/rev; Velocidad de Corte: 30 m/min; Recubrimiento: Sin. Espesor: 8.1 mm. Diámetro: 6.35, 9.53 mm; Avance: 100, 1000 mm/min; Velocidad de Corte: 6-30 m/min; Recubrimiento: Sin.
Broca brad & Spur [63]. 	Veniali et al. [76] Bhattacharyya et al. [77] Illo et al. [75]	Espesor: 3 mm; Diámetro: 3-8 mm; Avance: 0.026-0.094 mm/rev; Velocidad de Corte: 60-120 m/min; Recubrimiento: Sin. Espesor: 6mm; Diámetro: 10 mm; Avance: 0.1 mm/rev; Velocidad de Corte: 30 m/min; Recubrimiento: Sin. Espesor: 2-3 mm; Avance: 0.006-0.07 mm/rev; Velocidad de Corte: 120 m/min.
Broca core [81]. 	Zheng et al. [81]	Espesor: 6-14mm; Diámetro: 24 mm; Velocidad de Corte: 96-241 m/min; Recubrimiento: Diamante.
Broca de tubo [76]. 	Bishop et al. [76]	Espesor: 4mm; Diámetro: 9.5 mm; Avance: 0.05 mm/rev; Velocidad de Corte: 22.3, 40.4 m/min; Recubrimiento: Sin.

<p>Broca Saw [82]</p>  <p>Positive rake angle</p>	<p>Gao et al. [82]</p> <p>Espesor: 2mm; Diámetro: 30 mm; Avance: 5×10^{-4} mm/rev; Velocidad de Corte: 943 m/min; Recubrimiento: Diamante.</p>
---	--

Bishop et al. [74] desarrollaron un estudio de taladrado sobre material compuesto de aramida mediante el impregnado con una resina phenolica de 4mm de espesor. Buscaban comparar el efecto de la variación de la geometría de la broca durante el taladrado del material compuesto mediante una broca especial y una broca helicoidal convencional. Observaron que un incremento en el ángulo de punta derivaba en una mejora de la calidad superficial del taladrado durante el procesado del material. Las fuerzas de corte son dependientes, de la misma manera, del ángulo de punta, alcanzando un máximo para el ángulo de 180° , y, por el contrario, una reducción para valores del ángulo de punta superior al planteado. Aumentos en el ángulo de ataque de la broca generan un decrecimiento en el par, por el contrario, una variación del ángulo de punta de la broca presenta una escasa influencia sobre el mismo. El efecto de la velocidad de corte y el avance sobre el par, fuerza de corte y calidad superficial del taladro ha sido encontrado de escasa influencia cuando se compara con el efecto derivado de la variación de la geometría de la broca.

Di Ilio et al. [75,76] llevaron a cabo ensayos de taladrado sobre material compuesto de aramida. Di Ilio y sus colaboradores encontraron que la fuerza de corte seguía tendencias irregulares, las cuales fueron presentadas como distribuciones de fuerza de corte no uniforme a lo largo de los filos de corte, así como una pobre resistencia intralaminar del compuesto. De igual forma, pudieron estudiar la delaminación a lo largo del espesor material compuesto [76].

Bhattacharyya et al. [77] desarrollaron su investigación empleando dos geometrías de broca distintas, así como material compuesto a temperatura ambiente y después de ser aplicado un tratamiento criogénico. Encontraron que había un incremento en las fuerzas de corte generadas durante el taladrado por la broca en el material que fue sometido al tratamiento criogénico con respecto a aquel que no lo fue.

Shuaib et al. [79] realizaron ensayos experimentales sobre material compuesto de aramida con diferentes espesores mediante brocas con recubrimiento de TiN, así como variando los parámetros de corte. Llegaron a la conclusión de que el par durante el taladrado tiende a aumentar con incrementos de los parámetros de corte. De igual forma, determinaron que aumentos en el espesor de la placa de material compuesto a ensayar derivaban en aumentos en las fuerzas de corte. Además, pudieron establecer que tanto los parámetros de corte del taladrado como el espesor de la placa a ensayar presentaban una influencia significativa sobre la calidad del taladro.

Recientemente, Wu et al. [83] investigaron experimental y numéricamente la tensión residual generada durante el taladrado de placas de material compuesto de aramida de 3.5 mm de espesor mediante una técnica de interferometría. Encontraron que la componente de tensión residual de cada material a ensayar era compresiva a lo largo de los hilos de aramida y de tracción cuando ésta se desarrollaba de manera perpendicular a los mismos. Además, analizaron la influencia de la profundidad del taladro en el material compuesto sobre la tensión residual, resultando en disminuciones de la misma con aumentos en la profundidad del taladro.

2.3.3. Fibras naturales.


Actualmente, los materiales compuestos a base de fibras naturales son considerados como materiales prometedores pudiendo llegar a sustituir en el futuro a los materiales compuestos tradicionales [84-87]. En términos de matrices, los materiales poliméricos no biodegradables (como epoxy, polietileno o polipropileno) son empleados típicamente en conjunción con las fibras naturales [88]. Sin embargo, las matrices biodegradables (como los polisacáridos, proteínas, poliéster, lignina, lípidos, etc.) pueden, de igual forma, emplearse para obtener materiales compuestos 100% biodegradables [89]. La introducción de materiales compuestos 100% biodegradables reduce el uso de materiales no biodegradables y recursos no renovables. Además, la energía necesaria para producir fibras naturales es relativamente baja en comparación con las sintéticas (4GJ/ton en fibras naturales y 30 GJ/ton para la fibra de vidrio [90]). Los riesgos para la salud y el medio ambiente durante la producción y manipulación de compuestos biodegradables disminuyen comparado con las fibras sintéticas. De igual forma, se ha probado el uso de


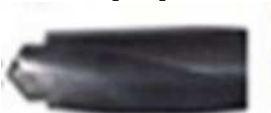


residuos de granjas y fábricas [91] así como los sobrantes obtenidos durante la fabricación de los materiales compuestos [92]. Éstas ventajas hacen de los biocomposites una alternativa real frente a los tradicionales [93,94].

Por el contrario, algunas de las desventajas de los compuestos biodegradables son las bajas propiedades mecánicas [89], baja resistencia a altas temperaturas [95], alta inflamabilidad [96], y poca adhesión entre las fibras y la matriz polimérica [97]. Considerando las desventajas y las ventajas, los compuestos a base de fibras naturales suponen una elección adecuada para numerosas aplicaciones industriales como paneles en coches [98,99], barcos [100] o aplicaciones eléctricas [22].

A pesar del gran número de estudios sobre el daño inducido durante el taladrado de materiales compuestos [53, 54, 101], existe una falta de investigaciones centrados en el taladrado de materiales compuestos completamente biodegradables. Únicamente algunos investigadores han analizado el proceso de taladrado de materiales compuestos con fibras naturales y matrices sintéticas como el poliéster y el epoxi (*Tabla 2.5*).

Tabla 2.5. Principales parámetros de corte y brocas empleadas en las investigaciones previas sobre fibras naturales.

Geometría de la Broca	Tipo de Compuesto	Referencias	Parámetros de corte
Broca Helicoidal [57]. 	Yute/Poliéster	Sidharan et al. [102]	Espesor: 3.75mm; Diámetro: 6 mm; Avance: 0.03, 0.06, 0.09, 0.12 mm/rev; Velocidad de Corte: 9.42, 15.072, 20.724, 26.376 m/min; Recubrimiento: Sin.
	Bamboo/Poliéster	Abilash et al. [103]	Diámetro: 4, 6, 8 mm; Avance: 0.03-0.04mm/rev; Velocidad de Corte: 6-34 m/min; Recubrimiento: Sin.
	Rosella-Sisal/Poliéster	Athijayamani et al. [104]	Espesor: 3 mm; Diámetro: 8 mm; Recubrimiento: Sin.
	Flax/Epoxy	Nasir et al. [105]	Diámetro: 8 mm; Avance: 0.16, 0.24 mm/rev; Velocidad de Corte: 75, 151 m/min; Recubrimiento: Sin.
	Grewia optiva-Sisal/PLA	Bajpai et al. [106]	Espesor: 5 mm. Diámetro: 8 mm; Avance: 0.05, 0.12 y 0.19 mm/rev; Velocidad de Corte: 23-70 m/min; Recubrimiento: Sin.
Broca brad & Spur [63].	Sisal /Poliéster	Ramesh et al. [107]	Espesor: 4 mm; Diámetro: 12 mm; Avance: 0.04, 0.08 mm/rev; Velocidad de Corte: 70 m/min; Recubrimiento: Sin.

			
Broca Jo [106]. 	Grewia optiva-Sisal/PLA	Bajpai et al. [106]	Espesor: 5 mm. Diámetro: 8 mm; Avance: 0.05, 0.12 y 0.19 mm/rev; Velocidad de Corte: 23-70 m/min; Recubrimiento: Sin.
Broca step [48]. 	Flax/Epoxy	Nasir et al. [105]	Diámetro: 8 mm; Avance: 0.16, 0.24 mm/rev; Velocidad de Corte: 75, 151m/min; Recubrimiento: Sin.
Broca Parabólica [106]. 	Grewia optiva-Sisal/PLA	Bajpai et al. [106]	Espesor: 5 mm. Diámetro: 8 mm; Avance: 0.05, 0.12 y 0.19 mm/rev; Velocidad de Corte: 23-70 m/min ; Recubrimiento: Sin.

Sidharan et al. [102] taladró un compuesto a base de yute/poliéster con una broca helicoidal en un Taladro Vertical. Pudieron observar mediante un análisis paramétrico como el daño inducido por el taladrado aumentaba con el avance y la velocidad de corte, identificando la delaminación como la principal forma de daño.

Abilash et al. [103] analizó el taladrado de material compuesto a partir de fibras de bamboo en matriz de poliéster, encontrando que el avance es el parámetro más influyente sobre el daño en el material, siendo el principal defecto la delaminación.

Athijayamani et al. [104] probaron un tratamiento álcali durante 8 horas en un material compuesto a base de un 30% (en peso) de fibras de sisal en matriz de poliéster, obteniendo una consecuente mejora en la calidad del taladro.

Nasir et al. [105] fabricaron un material compuesto a partir de lino y resina epoxy mediante el proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM). Concluyeron que el daño aumentaba con incrementos en el avance, y que, por el contrario, disminuía con la velocidad de corte. De igual forma, encontraron la delaminación como el principal mecanismo de daño. De acuerdo con los investigadores, la influencia de los parámetros de corte y los modos de fallo están relacionados con el método de fabricación y el tipo de

matriz. Ninguno de éstos estudios analizó el proceso del taladrado de materiales compuestos íntegramente biodegradables (matriz y fibra).

En ésta línea, Bajpai et al. [106] se centraron en el taladrado de materiales compuestos completamente biodegradables. Fabricaron el material mediante una matriz de ácido poliláctico (PLA) reforzada por fibras de sisal y Grewia optiva, analizando la influencia de la geometría de la broca en las fuerzas de corte y en la delaminación de salida.

Ramesh et al. [107] llevaron a cabo un análisis paramétrico determinando la rotura de las fibras como el modo de fallo principal, el cual aumenta con el avance y el uso de una geometría de broca especial en lugar de una broca helicoidal convencional.

De ésta revisión bibliografía puede extraerse la conclusión de que no existe ningún estudio relativo al proceso de taladrado en material compuesto 100% biodegradable donde se analicen el efecto de distintas fibras naturales, distintos espesores de compuesto, distintas geometrías de broca, y distintos parámetros de corte sobre el daño generado, las fuerzas de corte y el par.

2.4.MODELOS NUMÉRICOS PARA LA SIMULACIÓN DEL TALADRADO

En la actualidad existen precedentes en relación a la modelización numérica del taladrado sobre material compuesto de fibra de carbono (CFRPs). La mayor parte de éstos artículos presentan modelos de corte en compuestos basados en el corte ortogonal, debido principalmente a su simplicidad, y, por consiguiente, velocidad de ejecución [85, 108-110]. Las aproximaciones de los modelos a 2D, únicamente permiten la simulación del proceso sobre el material compuesto de manera unidireccional: además, la delaminación no puede ser estudiada.

Con objeto de poder introducir en el modelo el estudio de la delaminación y el uso de geometrías de herramienta más compleja, surgen los modelos numéricos de 3D, permitiendo, de igual forma, secuencias de apilamiento [52, 111]. Dichos modelos,

también se emplearon para evaluar la validez de los supuestos planteados en la formulación de las aproximaciones de los modelos 2D.

Dentro de los procesos de taladrado, el comportamiento del material (no axisimétrico), las geometrías complejas de la broca, así como el corte oblicuo, y la necesidad de cuantificar el daño generado en el proceso de taladrado, hacen necesarios la modelización numérica en 3D. Se pueden encontrar en la literatura, distintos modelos y aproximaciones para el proceso de taladrado. Los primeros modelos de taladrado, aproximaban la broca a un punzón, resaltando los trabajos de Durao et al. [112, 113] sobre material compuesto a base de fibra de carbono, y de Singh et al. [114], acerca del estudio de materiales compuesto a partir de refuerzo de fibra de vidrio. El objetivo principal de éstos modelos se centra en obtener la relación entre la generación del daño en el compuesto y las fuerzas de corte, hecho que parece ser uno de los factores principales en la generación del fallo durante el taladrado, y que ya fue estudiado por Upadhyay et al. [115]. Dichos modelos también se emplearon para estudiar la influencia del ángulo de punta de la herramienta en la generación del daño por delaminación sobre CFRPs [112]. Se pudo constatar, que el ángulo de 90° proporcionaba mejores resultados que los obtenidos con 104° y 118°. Posteriores mejoras en las simulaciones de taladrado derivadas de la necesidad de considerar otros modos de fallo, así como en la implementación de equipos de mayor capacidad y procesadores de alto rendimiento, han conducido al desarrollo de modelos de taladrado 3D complejos sobre CFRPs.

El taladrado se ha modelado satisfactoriamente incluyendo la penetración de la broca en el material, el criterio de fallo del material y la eliminación de la viruta [43, 116]. El modelado de los procesos de taladrado supone una dificultad elevada, fruto de la necesidad de simular la rotación de la broca y el avance, el empleo de un criterio de daño y suponiendo un coste computacional elevado.

Existen trabajos recientes centrados en la comparación entre modelos simplificados y complejos de taladrado de materiales compuestos [55].

En lo relativo al material compuesto biodegradable, existen escasos estudios relacionados con el desarrollo de modelos numéricos, siendo casi siempre modelos relativos a la

simulación de ensayos de caracterización del material [117], no encontrándose bibliografía alguna relativa al taladrado de dicho material.

De igual forma, para el material compuesto a base de aramida, destacan los modelos numéricos centrados en el impacto de objetos sobre el material (por su carácter de material empleado como protección balística) [73, 118]. Wu et al. [83] realizó un estudio para analizar el estrés en placas de material compuesto de fibra de aramida durante el taladrado, desarrollando un modelo numérico.

CAPÍTULO 3: Trabajo experimental

3.1.INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describirá el proceso de taladrado para los diferentes materiales compuestos objeto de estudio en esta tesis, y se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos.

Actualmente existen numerosos estudios que tratan de establecer los parámetros de corte óptimos, así como las herramientas más adecuadas para el taladrado de materiales compuestos. En el presente estudio se abarcará la optimización del proceso de taladrado, desde el punto de vista de la selección de las herramientas de corte más adecuadas, así como los parámetros de corte apropiados para reducir los posibles defectos derivados de dicho proceso. De igual forma, se tratará de determinar la relación entre dichos defectos y los parámetros de corte y geometrías de herramienta seleccionadas.

Todos los ensayos realizados se llevaron a cabo en un centro de mecanizado Kondia modelo B-500 (*Figura 3.21*).



Figura 3.21. Centro de mecanizado Kondia mod. B-500.

En la actualidad existen numerosos estudios que reflejan problemas relativos a la seguridad y salud en relación al procesado de materiales compuestos a base de fibras, principalmente de carbono y aramida [119]. Estos estudios indican que las fibras y microfibras generadas por el mecanizado de dichos materiales compuestos pueden ser potencialmente cancerígenos cuando entran al organismo a través de las vías respiratorias. Con objeto de paliar dichos efectos nocivos, así como evitar daños en el centro de mecanizado por la introducción de las fibras en elementos sensibles, se desarrolló un utillaje que permitía encapsular el material a ensayar, fijándolo y permitiendo la entrada de la broca (Figura 3.22.a)). De igual forma, permite la conexión de un aspirador con filtro de agua para la eliminación de las partículas nocivas. Todo ello se ha montado y fijado a través de la mordaza a la mesa del centro de mecanizado (Figura 3.22.b)).

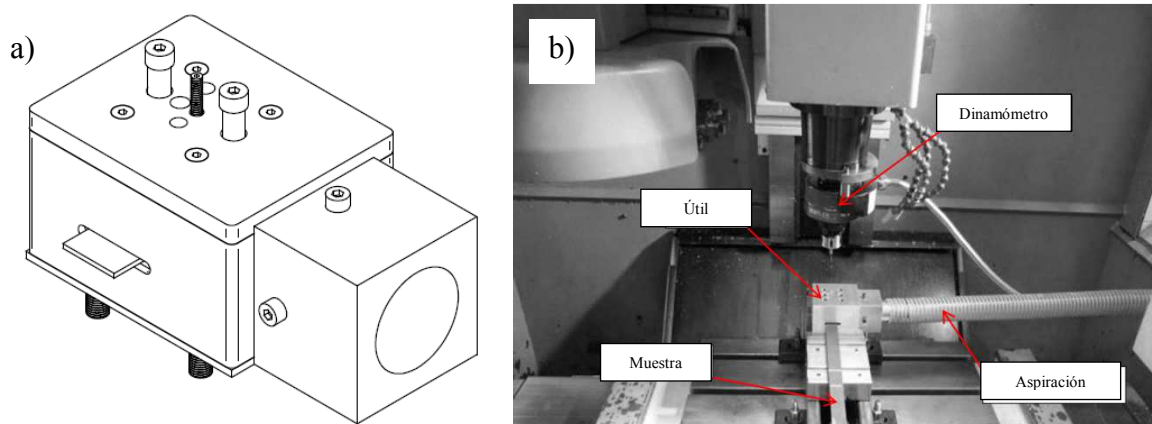


Figura 3.22. a) Útil de aspiración de fibras durante el proceso de taladrado; b) acople y fijación del útil al centro de mecanizado y así como al sistema de aspiración.

Como ya se planteó anteriormente, uno de los principales objetivos de éste trabajo es el reconocimiento de los defectos presentes en el material compuesto durante el taladrado y la influencia de los parámetros de corte en su progresión. Debido a ello, el útil implementado para el taladrado, a la vez que fija y aísla la muestra para su ensayo, permite la delaminación en un área de 10 mm alrededor del taladro para un diámetro nominal de 6 mm, y, de igual manera para el resto de diámetros de broca (*Figura 3.23*).

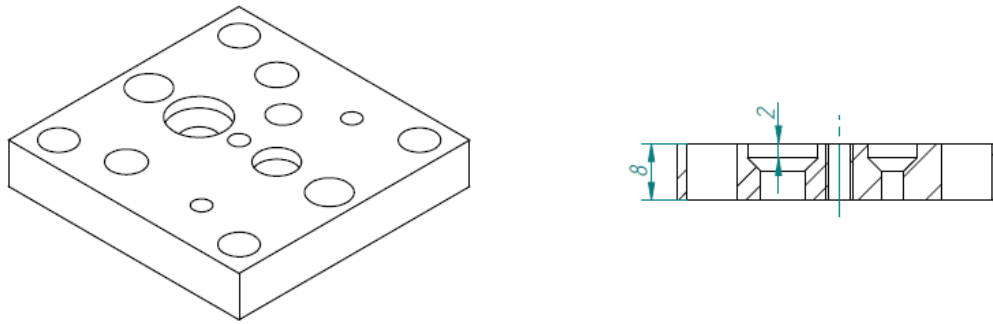


Figura 3.23. Placa inferior del utillaje para permitir la delaminación de la muestra en los distintos diámetros nominales a ensayar (6, 5 y 3 mm).

La elección de las geometrías de broca, así como el uso en éste estudio de las mismas, recubiertas o no, son fruto de las recomendaciones del fabricante (Guhring) [5] y de la bibliografía estudiada. Todos los ensayos realizados se desarrollaron con broca nueva en seco.

Con objeto de obtener una mayor información de la calidad superficial de la pieza, así como de los posibles defectos originados en la misma debido al taladrado, se desarrolló un modelo numérico que se expondrá en el Capítulo 4. Para validar el modelo se midieron las fuerzas de corte y el par durante el taladrado, con diferentes parámetros de corte, empleándose los siguientes elementos:

- Dinamómetro rotativo piezoeléctrico Kistler Modelo 9132C. Con objeto de cuantificar la fuerza axial y el par torsor generada por la broca se empleó el dinamómetro piezoeléctrico rotativo Kistler Modelo 9123C, que permite medir las componentes de la fuerza en las 3 direcciones del espacio, así como el par torsor correspondiente al eje de rotación (F_x , F_y , F_z , M_z). Debido a su alta rigidez posee frecuencias naturales muy altas y su precisión y sensibilidad le permiten determinar pequeños cambios en la fuerza que está midiendo (*Figura 3.24*).

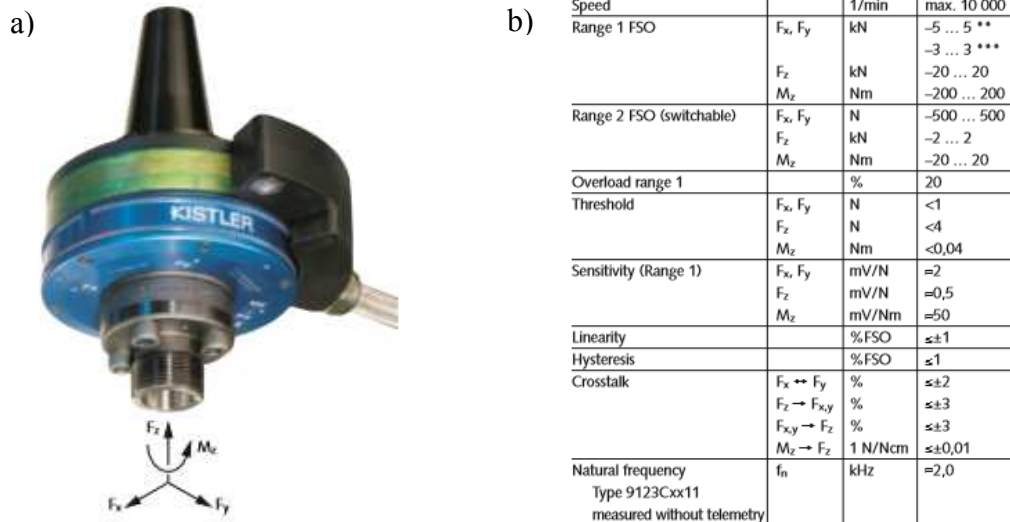


Figura 3.24. a) Dinamómetro piezoeléctrico rotativo Kistler Modelo 9123C; b) Ficha técnica [120].

- Sistema de acondicionamiento y adquisición de datos:
 - Amplificador.
 - Tarjeta de adquisición de datos.

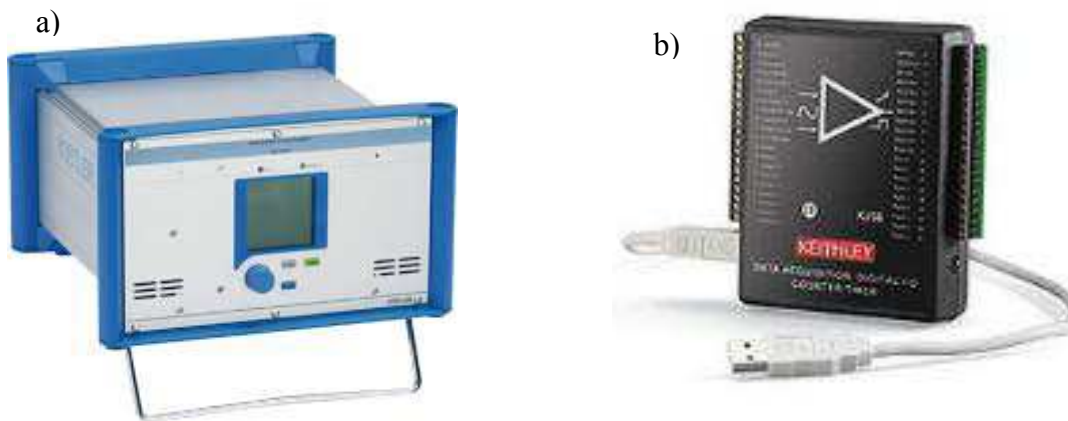


Figura 3.25. a) Amplificador de carga Kistler 5070A [51]; b) Tarjeta de adquisición de señales KEITHLEY KUSB-3100m.

El dinamómetro rotativo emite señales de carga eléctrica de baja amplitud (picoculombios), proporcionales a las fuerzas y par torsor generadas durante los ensayos de taladrado. Dichas señales son amplificadas mediante un amplificador

de carga Kistler, modelo 5070A, definiendo una ganancia de 200. El amplificador manda una señal de salida en forma de tensión eléctrica ($\pm 10V$) que se registra por medio de un ordenador a través de una tarjeta de adquisición de señales KEITHLEY, modelo: KUSB-3100m, resolución: 12 – 16 bit (*Figura 3.25*).

Con objeto de tratar la señal proporcionada por el dinamómetro (fuerza axial y par torsor) a través de la tarjeta de adquisición se ha empleado el software comercial Dyno Wire que permite al usuario definir la frecuencia de muestreo y activar la grabación de los datos adquiridos. Dicha información puede ser exportada a Excel para su representación o bien a Matlab u otro programa similar para su procesamiento (filtrado y acondicionamiento de la señal). La frecuencia de adquisición de datos se fijó en 200 Hz para todos los canales.

A fin de poder cuantificar los defectos en las muestras de material compuesto tras el proceso de taladrado se han analizado las mismas a través del microscopio óptico Optika SZR (*Figura 3.26.a*). Dicho microscopio lleva implementado una cámara en la óptica que permite la captura de imágenes a través del software Optika Visión Pro. Mediante éste software se puede tratar la imagen, escalándola y cuantificando los defectos que se hayan reflejado en la muestra.

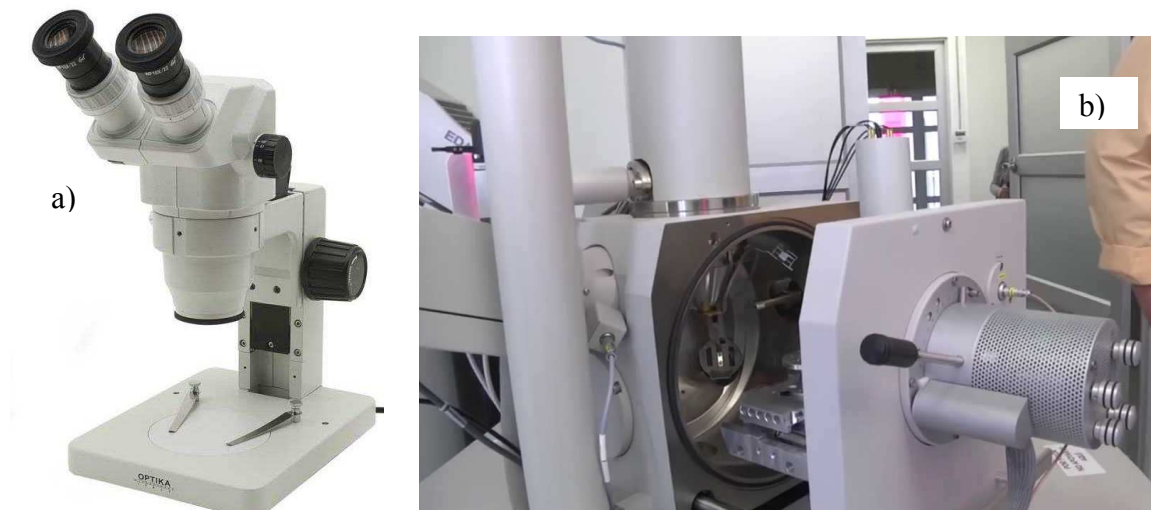


Figura 3.26. a) Microscopio óptico modelo Optika SZR; b) Microscopio electrónico de barrido (SEM).

De igual forma se ha hecho uso del microscopio electrónico de barrido (SEM) para estudiar la calidad de las paredes del taladro en el caso concreto del material compuesto a partir de fibras naturales (*Figura 3.26.b*)).

En los siguientes apartados, se describirán los distintos ensayos realizados sobre los distintos materiales compuestos planteados, sus principales defectos derivados de su procesado, así como los resultados y las conclusiones obtenidas de los mismos.

3.2.DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.

3.2.1. Fibra de Carbono

Material

Se han estudiado dos materiales compuestos CFRP, uno bidireccional (tejido) formado por fibras de carbono AS-4 y matriz de epoxy 8552, con un espesor total de 2,2 mm y compuesto de 10 capas con la misma orientación (0°); y otro, un laminado compuesto de 24 capas unidireccionales. Está fabricado a partir de fibras de carbón IM7 y matriz de epoxy MTM-45-1 con una secuencia de apilado $[45/-45/0/90]_{3s}$. El espesor aproximado de éste segundo material es de 3 mm.

Tabla 3.6 Propiedades mecánicas para el material en cinta y en tejido, materiales objeto de estudio.

<i>Propiedades</i>	<i>Tejido</i>	<i>Cinta</i>
E_1 (GPa)	68	173
E_2 (GPa)	68	7.36
E_3 (GPa)	10	7.36
ν_{12}	0.22	0.33
G_{12} (GPa)	5	3.89
X_t (MPa)	795	2998
X_c (MPa)	860	1414
Y_t (MPa)	795	37
X_c (MPa)	860	169
S_t (MPa)	98	120

Las propiedades mecánicas de ambos materiales se muestran en la *Tabla 3.6*, siendo: E_i el módulo elástico en la dirección i ; ν_{ij} el coeficiente de Poisson; G_{ij} el módulo elástico en las direcciones de corte; X_t , Y_t y S_t la máxima tensión a tracción en la dirección longitudinal y de corte respectivamente; X_c y Y_c la máxima tensión a compresión en la dirección longitudinal.

Geometrías de Broca y Parámetros de Corte.

Se han estudiado tres geometrías de broca distintas de 6 mm de diámetro para cada tipo de material: broca Brad; una broca nueva tipo Step con una longitud para el paso de 66 mm y en la que el diámetro pasa de 4 mm a 6mm; y una broca Reamer con cuatro filos de corte (*Figura. 3.27*).

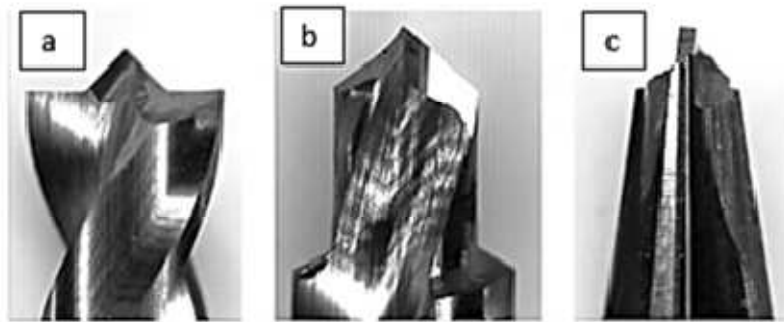


Figura 3.27 Geometrías de broca empleadas para el estudio de los parámetros de corte óptimos en relación al material compuesto de fibra de carbono.

Todas las brocas analizadas han sido fabricadas por Guhring [5] con un sustrato de CW sin recubrimiento y nuevas, con objeto de evitar el efecto del desgaste.

Tabla 3.7 Condiciones de corte empleadas en los ensayos de taladrado de fibra de carbono.

Parámetros	Rango		
a (mm/rev)	0.05	0.1	0.15
V_c (m/min)	25	50	100

Los ensayos se llevaron a cabo en seco para evitar la contaminación del material compuesto con los fluidos de corte. No se han empleado taladros previos en ningún caso

de los planteados. Las condiciones de corte empleadas para los ensayos se resumen en la *Tabla 3.7*.

Delaminación.

La delaminación ha sido cuantificada a través del factor de delaminación (F_d), definido como la relación entre el diámetro máximo del área delaminada y el diámetro nominal del taladro definida en el Capítulo 2 a través de la *Ecuación 2.2* (*Figura 3.28*).

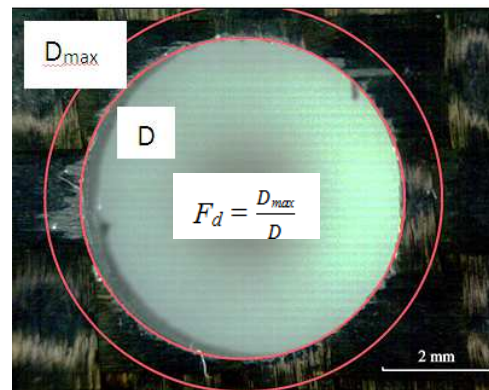


Figura 3.28. Cuantificación del factor de delaminación.

Aunque éste factor de medida no se ajusta totalmente al área dañada, es la aproximación más empleada en la bibliografía debido a su simplicidad. Ésta técnica de medida sólo considera la delaminación de las capas superficiales visible externamente y distinguir entre: entrada y salida. La delaminación de entrada se encuentra alrededor del taladro en la entrada como consecuencia de las aristas de corte de la broca, generando un levantamiento de las capas que componen el material compuesto y, en consecuencia, una separación de las mismas. Por el contrario, la delaminación de salida es debida a las fuerzas de corte durante el taladrado, originando un empuje de las últimas capas durante dicha operación, y como consecuencia la rotura y separación de las mismas.

Resultados.

Los resultados experimentales han sido evaluados en términos de fuerzas de corte, par y delaminación causado en el material durante el taladrado del material compuesto. Las zonas de entrada y salida del taladro son las zonas más críticas en cuanto a delaminación

se refiere. Cuando los filos de corte de la broca hacen contacto con el material, se produce un efecto de "pelado" que produce el levantamiento de las láminas superiores. La progresión del desgaste supone un aumento de las fuerzas de corte y un decrecimiento del efecto de "pelado", la cual provoca la disminución de la delaminación de entrada y aumenta la de salida [2].

La fuerza de corte y el par dependen de la geometría de la broca [30,61]. En la *Figura 3.29* se puede observar la evolución de las fuerzas de corte y el par durante los ensayos de taladrado sobre el material en tejido para un avance de 0.1 mm/rev y una velocidad de corte de 100 m/min. Se obtuvieron curvas similares para el material en cinta.

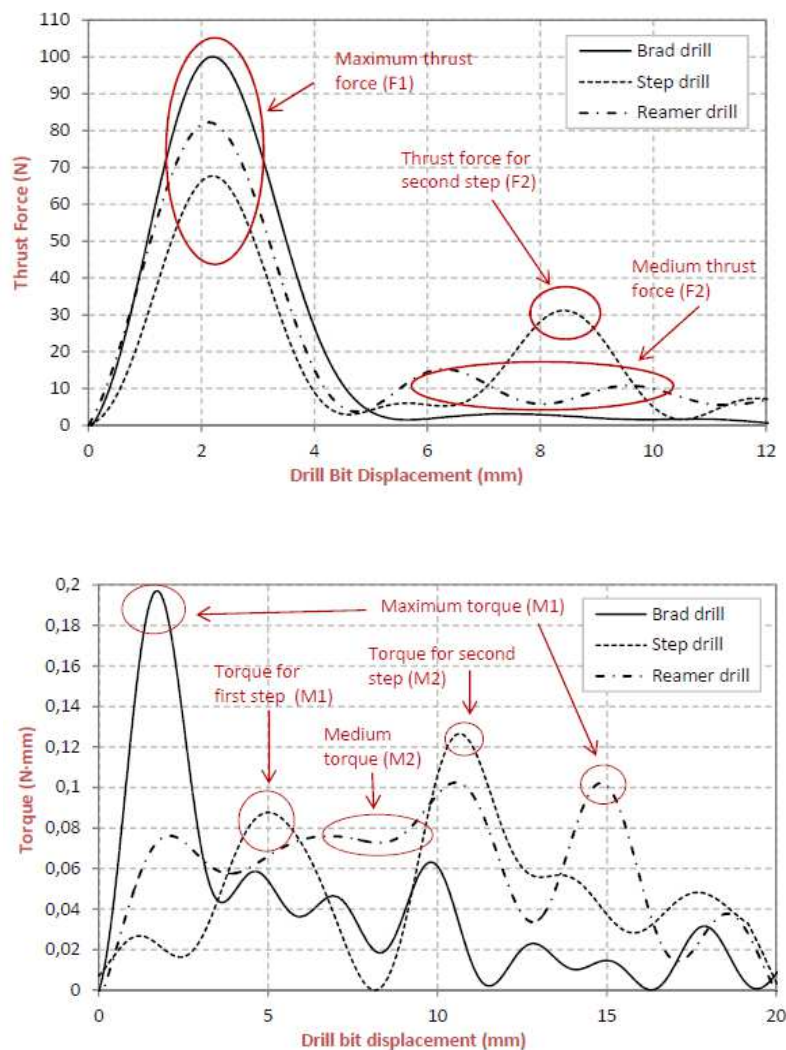


Figura 3.29. Evolución de las fuerzas de corte y del par para las geometrías de broca analizadas en tejido. Avance 0.1 mm/rev y Velocidad de corte 100 m/min [2].

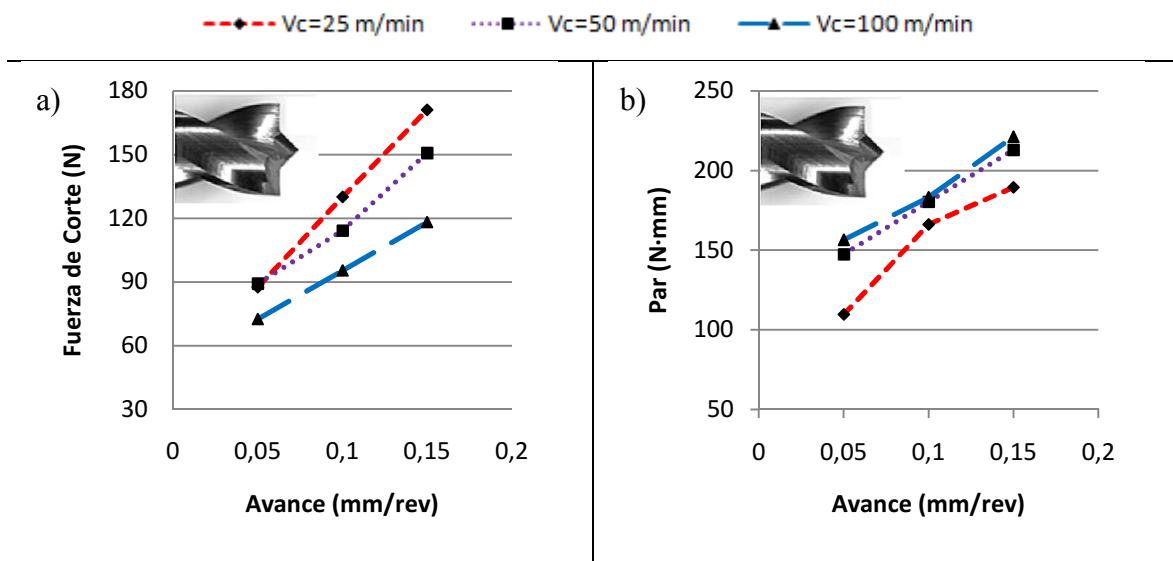
En la *Figura 3.29* puede verse claramente para la broca Brad, el punto correspondiente a la máxima fuerza y el máximo par, alcanzado cuanto la punta de la broca ha atravesado completamente en el material. El ángulo de punta de 180° ocasiona un rápido incremento de las fuerzas, siendo el máximo, alcanzado rápidamente.

Considerando la broca Step, se pueden apreciar dos picos, correspondientes cada uno de ellos a los dos diámetros de la broca (4 y 6 mm). El primero es debido a la punta de la broca, correspondiente al diámetro de 4mm (F_1 y T_1), y el segundo de ellos es fruto del aumento del diámetro a 6 mm en el siguiente paso (F_2 y T_2).

De igual forma, teniendo en cuenta la broca Reamer, se puede apreciar un primer pico en la fuerza de corte correspondiente a la entrada de la parte cónica de la broca, seguido de una parte plana, concerniente al máximo valor del par, el cual aparece cuando la parte cilíndrica de la broca está taladrando. El valor absoluto máximo de la fuerza de corte representa el valor más bajo para la broca Step. La broca Reamer y la broca Brad presentan valores máximos de fuerza de corte, siendo estos ligeramente superiores a los obtenidos por la broca Brad.

Material: Tejido.

Se puede observar en la *Figura 3.30* los valores significativos de la fuerza de corte y del par, para los parámetros de corte anteriormente planteados y las geometrías de broca ensayadas.



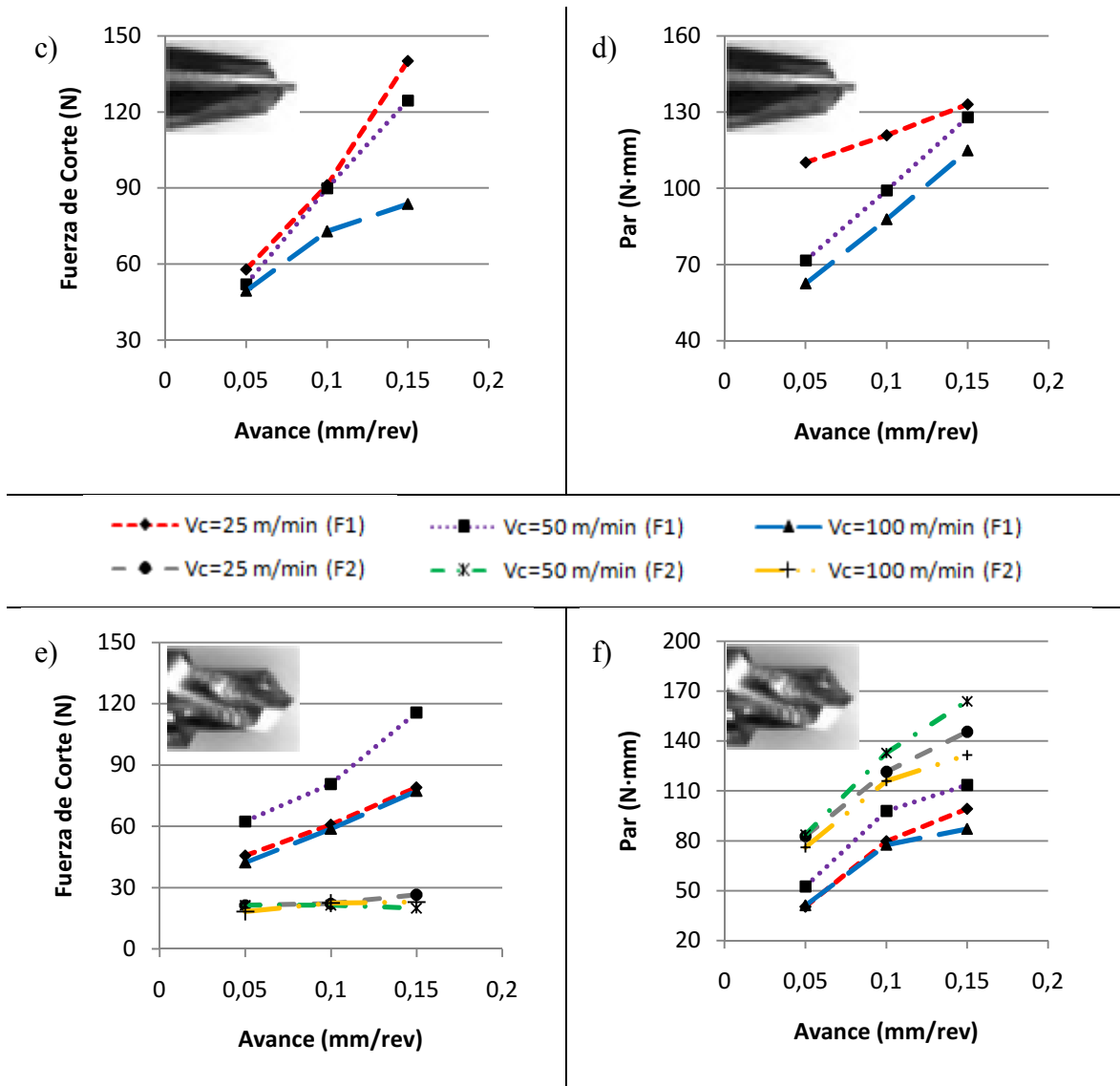


Figura 3.30. Variación de las fuerzas de corte frente al avance para la broca Brad (A), broca Reamer (C) y la broca Step (E); y el par frente al avance para la broca Brad (B), broca Reamer (D) y la broca Step (F) para tejido.

Para todos los casos, el máximo valor de la fuerza de corte (F_1) aumenta con el avance, sin embargo, para la broca Step y la broca Reamer, la fuerza de valor medio (F_2) se ve poco influida por las condiciones de corte, algo que concuerda con estudios anteriores [57, 58]. Por el contrario, la broca Brad provoca mayores aumentos en la fuerza de corte (hasta el 92%).

En general las fuerzas de corte decrecieron con la velocidad de corte (hasta el 45%). Los valores máximos de fuerzas de corte se presentaron con la broca Brad, mientras que los valores más bajos se dieron para la broca Reamer.

El análisis del par denota aumentos del mismo con el avance en todos los casos (*Figura 3.30*). Se obtuvieron variaciones del 63%, 96% y 84 % para la broca Brad, Step y la broca Reamer respectivamente. Sin embargo, la velocidad de corte planteó diferentes efectos en función de la geometría: la broca Brad tuvo un crecimiento positivo mientras que la broca Reamer presentó una tendencia contraria. De igual forma, el par mínimo se dio para la broca Reamer mientras que el valor máximo se presentó para la broca Brad.

El factor de delaminación cuantificado para la entrada y la salida para el material de tejido se puede observar en la *Figura 3.31*. Se puede observar como el máximo valor de la delaminación en la entrada aumenta hasta el 10% en el caso de la broca Brad y hasta el 18% en el caso de la broca Reamer cuando aumenta el avance. Por el contrario, la broca Step no presenta variaciones significativas. Fijándonos en la influencia de la velocidad de corte, la delaminación de entrada para la broca Brad y la broca Step aumenta hasta el 8 y 4% respectivamente. Por contra, la delaminación de entrada decreció con la velocidad del husillo hasta el 15% para la broca Reamer.

La delaminación de salida aumentó hasta el 17,5% para la broca Brad y el 10% para la broca Step con el avance, mientras que la broca Reamer no muestra una variación significativa con el mismo. De igual forma, la delaminación de salida aumentó con la velocidad de corte para la broca Brad y Step hasta el 10 y 6% respectivamente, mientras que en el caso de la broca Reamer se puede observar un decrecimiento de la misma. Comparando el efecto de la geometría de la broca, el valor mínimo de delaminación aparece para la broca Step ($F_d=1.04$), mientras que el máximo se da para la broca Brad ($F_d=1.45$). La configuración óptima a la luz de los resultados parece ser la broca Step, debido al efecto de retaladrado de los distintos diámetros a lo largo de su longitud.

En el caso de la delaminación de salida, el valor mínimo se observó para la broca Reamer ($F_d=1.01$), mientras que el máximo se presenta para la broca Brad ($F_d=1.54$). La delaminación de salida está relacionada con la fuerza de corte y la configuración del taladro. El valor máximo de fuerzas de corte y de delaminación de salida se presenta para la broca Brad. Aunque la broca Step y Reamer presentan valores similares de fuerzas de corte, se puede observar un valor más pequeño de delaminación para la broca Reamer. Éste efecto puede estar relacionado con la configuración de múltiples diámetros de la

broca Step, debido a que el taladro final se realiza sobre un taladro previo correspondiente al diámetro de 4 mm.

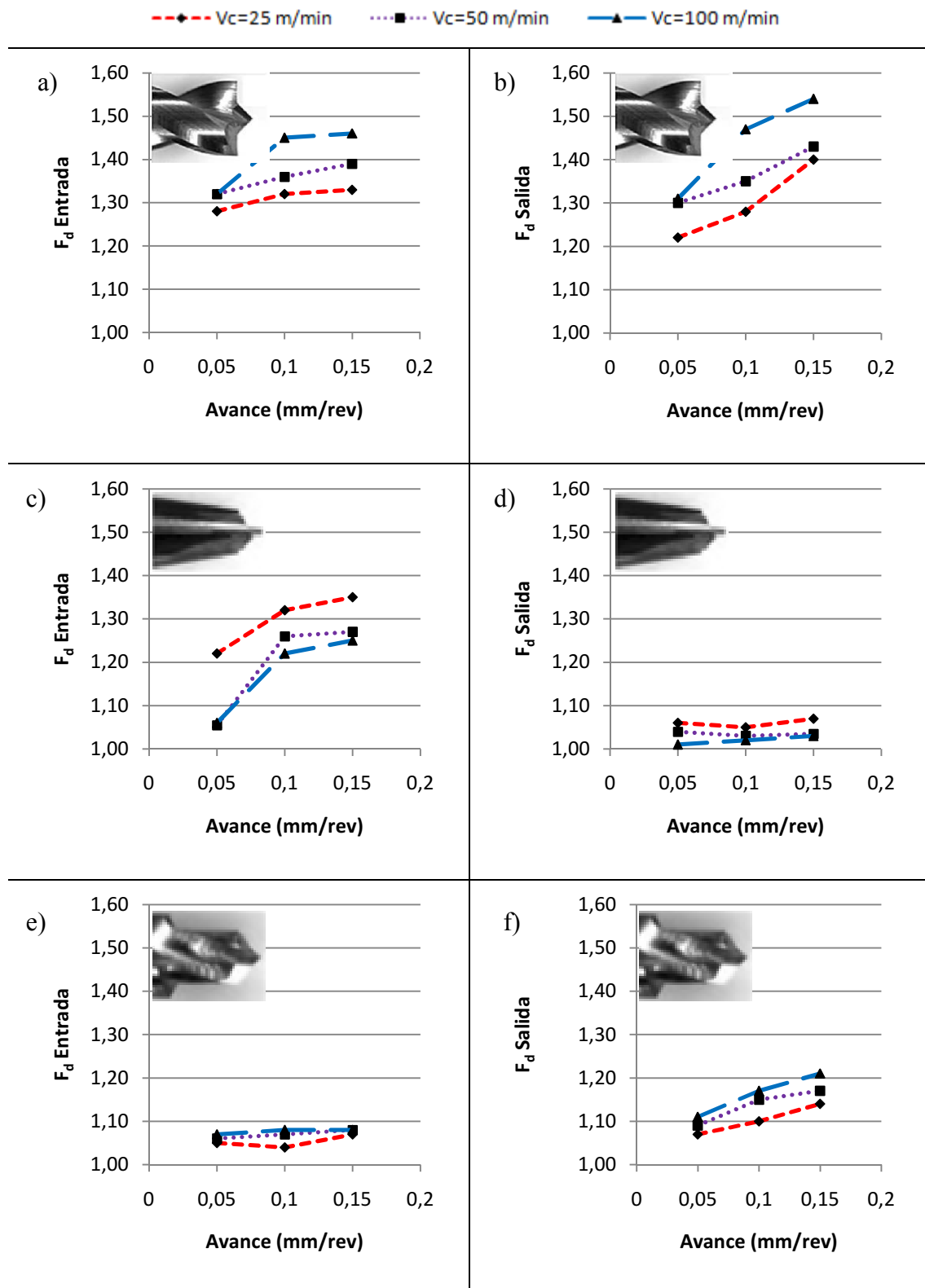
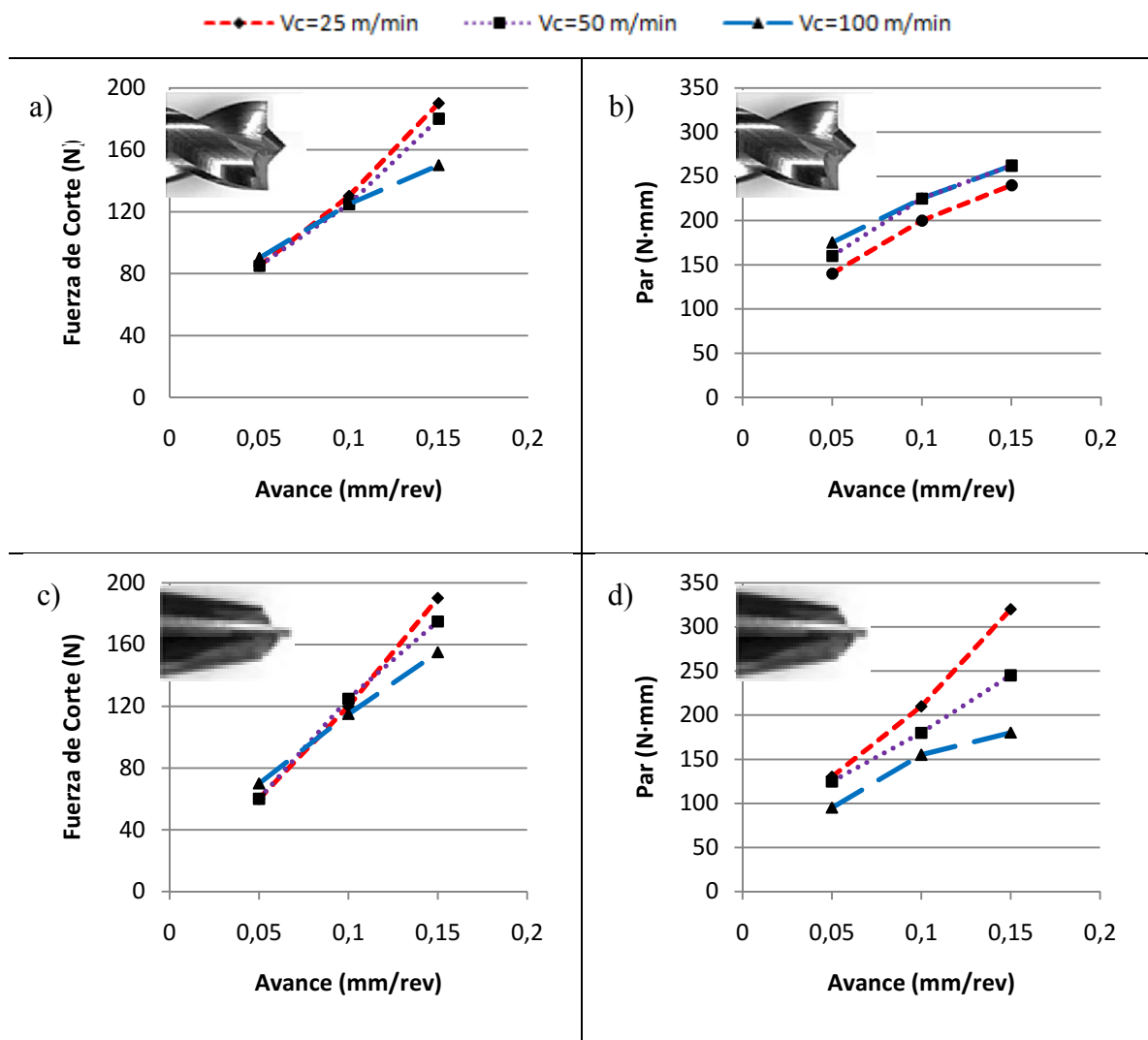


Figura 3.31. Factor de delaminación frente al avance para la broca Brad (A, B), la broca Step (E, F) y la broca de escariar (C, D) para el material en tejido.

Material: Multidireccional (Cinta).

La evolución de las fuerzas de corte con el tiempo para el material en cinta presenta valores similares a los obtenidos para el material en tejido. Las fuerzas de corte aumentan con el avance para todas las geometrías analizadas (*Figura 3.32*).

El incremento de las fuerzas efectivas (F_2 en el caso de la broca Reamer) fue de alrededor del 120 % para la broca Brad, 18% para la broca Step y 90% para la broca Reamer. La variación de la velocidad de corte no aporta una influencia significativa en las fuerzas de corte a bajos valores de avance. Sin embargo, cuando la velocidad del husillo aumenta, la influencia lo hace de igual forma, especialmente en el caso de la broca Brad: presenta una reducción de 20% en las fuerzas de corte.



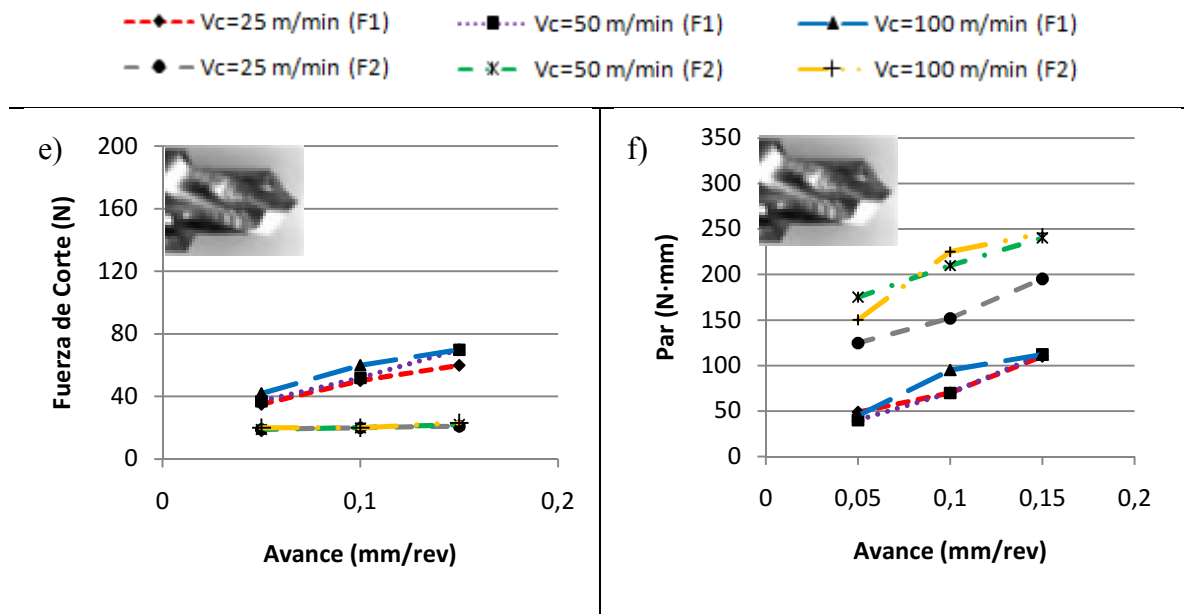


Figura 3.32. Variación de las fuerzas de corte con el avance para la broca Brad (A), broca Reamer (C), y Step (E); y par frente a avance para la broca Brad (B), Reamer (D) y Step (F) para el material en cinta.

El máximo nivel de las fuerzas de corte representa los mínimos valores para la broca Step. La broca Reamer y la broca Brad presentan valores de máxima fuerza similares. Ésta circunstancia coincide con estudios previos presentes en la bibliografía [30].

El par aumenta con el avance hasta el 66% para la broca Brad, 60% para la broca Step y un 144% para la broca Reamer. Aumentos en la velocidad de corte derivan en aumentos en el par, siendo estos de alrededor de un 24% para la broca Brad, un 48% para la broca Step, y, por el contrario, un descenso para la broca Reamer de hasta un 72%.

El factor de delaminación se ha cuantificado para las tres geometrías de broca y se ha representado en la Figura 3.33. En general, aumentos en el avance derivan en aumentos en la delaminación para todos los casos.

La delaminación de entrada aumentó hasta en un 24% para la broca Brad. La broca Step muestra un máximo en la delaminación para el valor intermedio de la velocidad de corte (50 m/min) y para el valor más alto de la velocidad de corte, la delaminación decreció de nuevo. En lo relativo a la delaminación de entrada, ésta aumenta con la velocidad de corte hasta el 8% para la broca Brad y el 5% para la broca Step. La velocidad de corte no

muestra influencia aparente en relación con la delaminación de entrada para la broca Reamer.

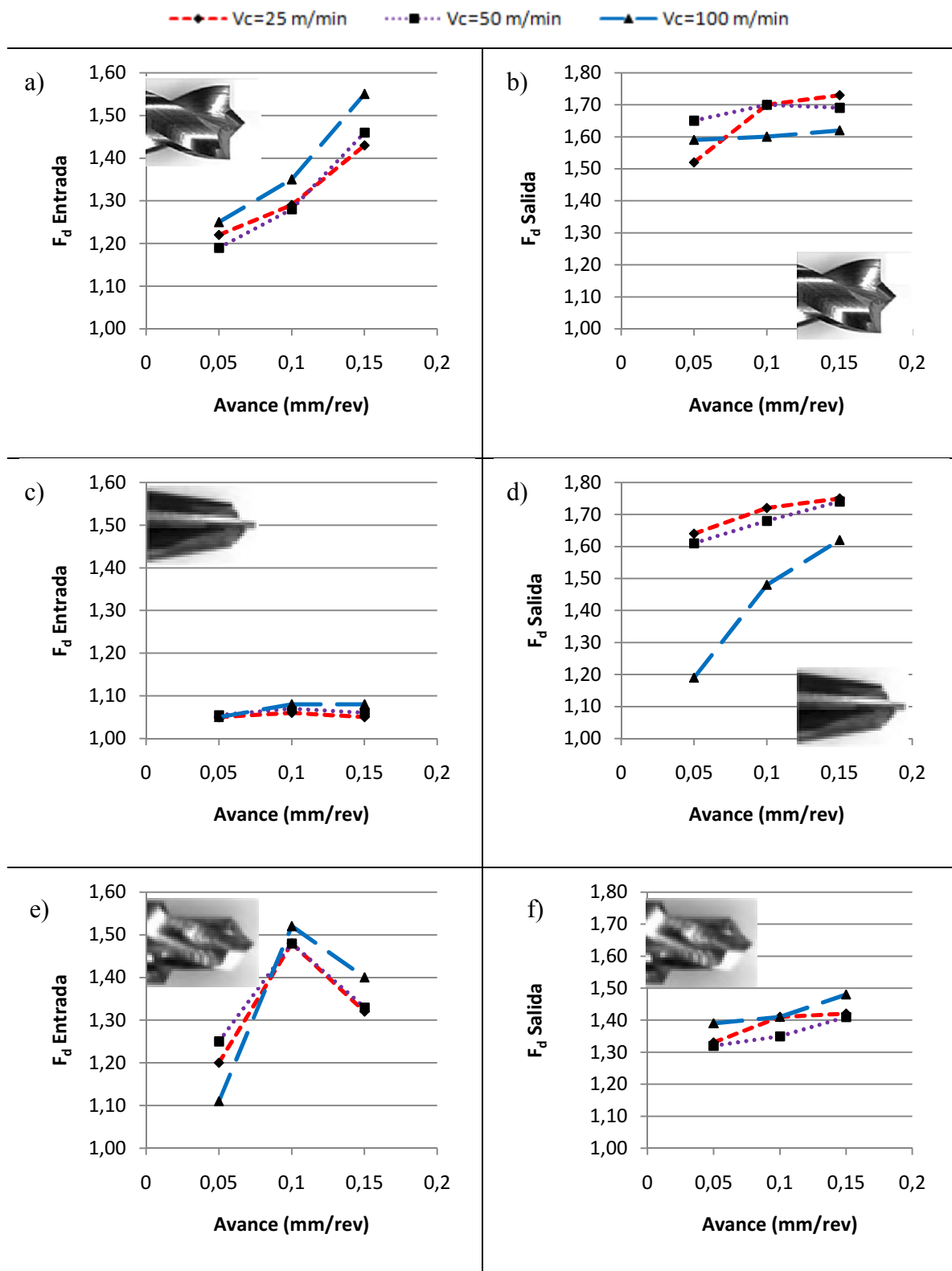


Figura 3.33. Factor de delaminación en función del avance para la broca Brad (A, B), Reamer (C, D) y Step (E, F), para el material en cinta.

La delaminación de salida aumenta con el avance hasta el 11, 6 y 38% para la broca Brad, Step y Reamer respectivamente. Las variaciones en la velocidad de corte suponen una escasa influencia para las brocas Brad y Step (menos del 8%), mientras que para la broca Reamer el factor de delaminación aumentó hasta el 37%.

La máxima delaminación de entrada se presentó para la broca Brad ($F_d=1.54$), mientras que la mínima se obtuvo para la broca Reamer ($F_d=1.08$). En relación con la delaminación de salida, la máxima se obtuvo para la broca Brad ($F_d=1.73$), y, por el contrario, la mínima se presentó en la broca Step ($F_d=1.32$). Esto es debido a la baja fuerza de corte de la broca Step en la última capa para éste tipo de materiales compuestos. Sin embargo, cuando se taladra con bajas relaciones de avance, la broca Reamer mejora los resultados de la broca Step ($F_d=1.18$) en concordancia con los resultados obtenidos de la literatura [30].

Comparación entre el material compuesto en forma de tejido o en cinta.

Las fuerzas de corte obtenidas durante el taladrado del material compuesto en forma de tejido o en cinta no son directamente comparables debido a la diferencia de espesor que ambos materiales presentan entre sí (2.2 mm en tejido y 3 mm en cinta). Con objeto de poder compararlos se han normalizado mediante el espesor del material, representando el valor unitario (*Figura3.34*).

La tendencia general es que las fuerzas de corte sean mayores para el material en tejido en comparación con el mismo en cinta, debido a las mejores propiedades mecánicas de la fibra del primero, y que suponen por tanto una energía de rotura superior.

Por el contrario, la delaminación de salida para el material en cinta en la mayoría de los casos es mayor que el observado para el material en tejido. La estructura del material en tejido presenta una clara ventaja cuando se trata de minimizar la delaminación durante el taladrado: aunque para taladrar el material son requeridas fuerzas elevadas, al mismo tiempo, la separación de las capas es más difícil. En la *Figura3.34.a)* se puede observar

un ejemplo comparando la relación entre las fuerzas de corte y la delaminación para la broca Brad en ambos formatos de material compuesto.

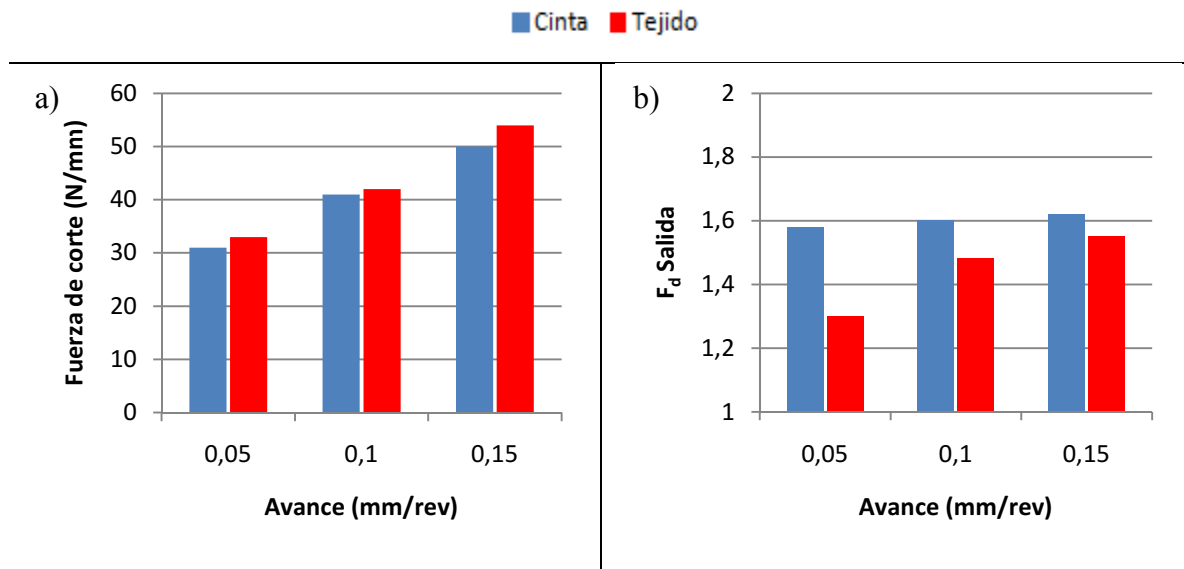





Figura 3.34. Variación de las fuerzas de corte (a)) y de la delaminación de salida(b)) para la broca Brad. Velocidad de corte: 100 m/min.

Otros defectos superficiales.

Comparando los defectos superficiales observados después del taladrado para ambos materiales, se puede constatar que el material en cinta es más vulnerable al daño: la calidad superficial del material en cinta es siempre inferior en comparación con el tejido para cualquier geometría (Figura 3.35 y 3.36).

Geometrías de Broca	Cinta	
	F _d Entrada	F _d Salida
		

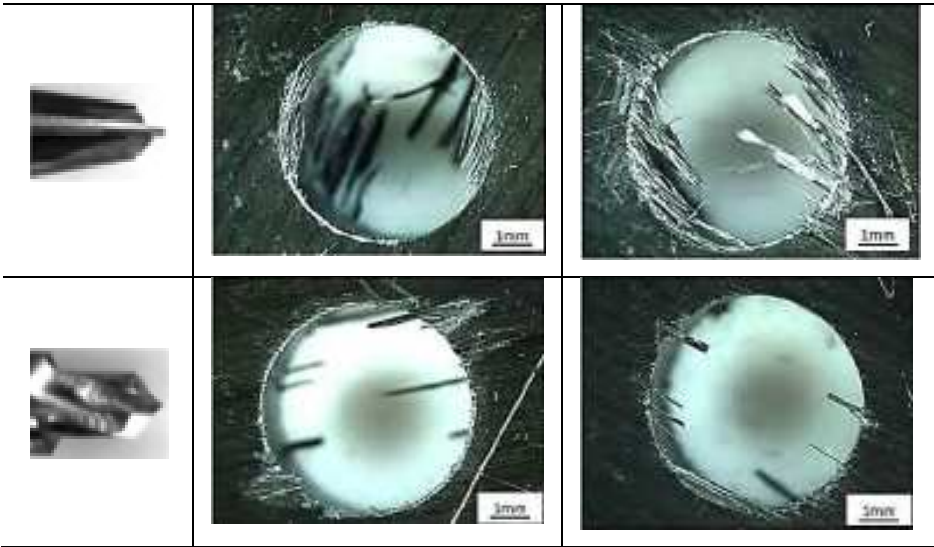


Figura 3.35. Delaminación y otros defectos en material en cinta para las tres geometrías de broca($V=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev).




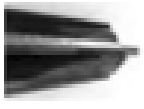





Geometrías de Broca	Tejido	
	F_d Entrada	F_d Salida
		
		
		

Figura 3.36. Delaminación y otros defectos en material en tejido para las tres geometrías de broca($V=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev).

El defecto de "Fraying" ha aparecido en todos los casos: En la broca Reamer y Step se encuentra principalmente en la salida, sin embargo, en la broca Brad aparece en la entrada (Figura 3.37).

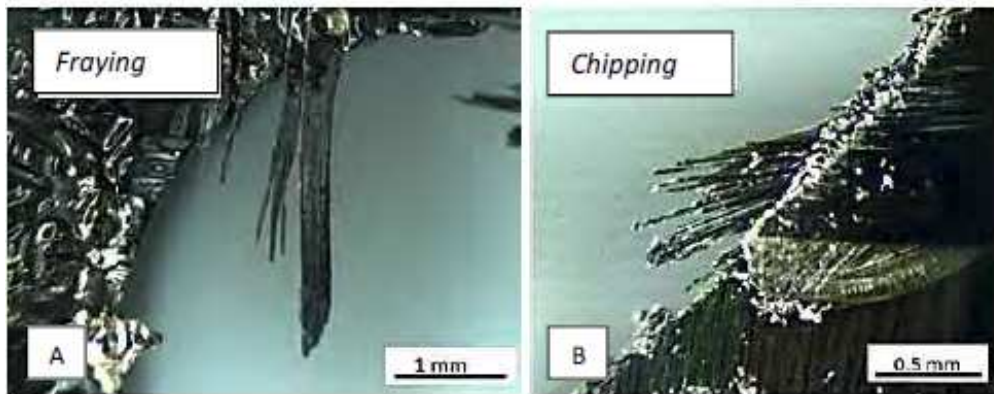


Figura 3.37. Defectos relacionados con la calidad del taladro. (A) fraying; (B) chipping.

Además, el área de daño encontrada para el material de tejido es muy pequeña (*Figura 3.36*). Únicamente la geometría Step causa algo de "chipping" a la salida y entrada del taladro. En la *Figura 3.35* y *3.36* se puede observar también que la calidad de la superficie para la broca Reamer es la mejor tanto para la entrada como para la salida.

Conclusiones Parciales.

A continuación, se resumen algunas de las conclusiones más importantes derivadas de los ensayos experimentales sobre el material compuesto en tejido y en cinta:

- Se puede observar como la broca Reamer, dentro de las estudiadas, es la geometría más adecuada para taladrar en material en tejido, con un avance pequeño y una velocidad de corte elevada. Además, las fuerzas de corte y par obtenidas son de las menores, en comparación al resto de autores. De igual forma, la delaminación es pequeña, entre un 1.01 y un 1.08.
- La broca Reamer también puede ser óptima para el material en cinta, trabajando con un avance bajo y una velocidad de corte alta, la cual, supone un parámetro importante debido a que su influencia sobre la delaminación es alta. La delaminación se encuentra entre los valores del 1.06 y 1.18, apareciendo en conjunción con otros defectos superficiales como el "Fraying".
- La broca Brad presenta los valores de fuerzas de corte más altos y en consecuencia la peor calidad superficial.

- En relación a la influencia de la configuración de las fibras en el material compuesto, se puede concluir que el material en cinta es más susceptible de sufrir daño por delaminación que el material en tejido, experimentando una delaminación alta mientras las fuerzas de corte son bajas. El defecto por "Fraying" se presenta en todos los taladros. La calidad superficial para el material en tejido es siempre mejor para todas las condiciones analizadas.

3.2.2. Fibra de Aramida

Material

El material a ensayar se presenta en un formato de 2.5 mm de ancho y un largo variable, con una densidad de 8.86 kg/m^2 , representativo de la configuración de protección balística en material compuesto de aramida. El material está formado por 12 capas de tejido de aramida impregnadas en matriz fenólica (Polivinyl butiral fenólica) mediante apilamiento manual y posteriormente prensado en caliente hasta conseguir el espesor total de 3.7 mm. Ésta configuración ha sido ampliamente estudiada por diversos autores [74].

Las propiedades mecánicas de las fibras de aramida se muestran en la *Tabla 3.8*, siendo: E_i el módulo elástico en la dirección i ; ν_{ij} el coeficiente de Poisson; G_{ij} el módulo elástico en las direcciones de corte.

Tabla 3.8 Propiedades mecánicas para el material de aramida.

Propiedades	Aramida
E_1 (MPa)	18000
E_2 (MPa)	18000
E_3 (MPa)	6000
ν_{12}	0.25
ν_{13}	0.33
ν_{23}	0.33
G_{12} (MPa)	770
G_{13} (MPa)	2600
G_{23} (MPa)	2600

Geometrías de Broca y Parámetros de Corte.

Se han estudiado dos geometrías de broca distintas de 6 mm de diámetro para el material planteado: una broca Brad y una broca helicoidal HSS, ambas sin recubrimiento (*Figura 3.38*).

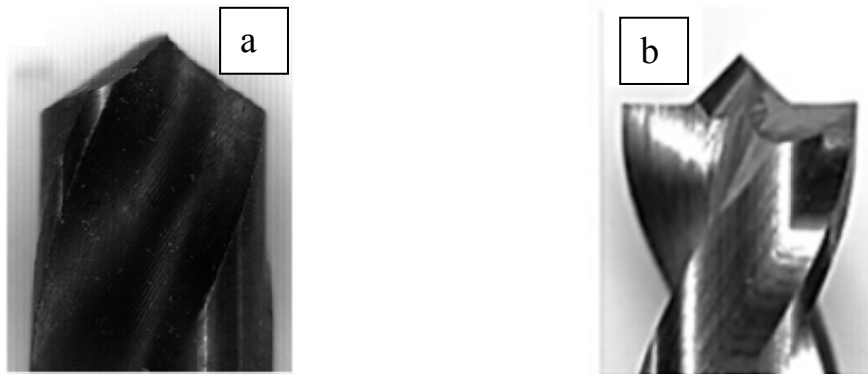


Figura 3.38. Brocas objeto de estudio. a) Broca helicoidal; b) Broca Brad.

Ambas brocas han sido proporcionadas por Guhring [5] nuevas, con objeto de evitar el efecto del desgaste fuera del análisis del presente trabajo.

Los ensayos se llevaron a cabo en seco para evitar la contaminación del material compuesto con los fluidos de corte. No se han empleado taladros previos en ningún caso de los planteados. Las condiciones de corte empleadas para los ensayos son las recomendadas por el fabricante (*Tabla 3.9*).

Tabla 3.9 Condiciones de corte recomendadas para la realización de los ensayos.

Parámetros		Rango		
<i>a</i> (mm/rev)	0.025	0.05	0.1	
<i>Vc</i> (m/min)	40	75	110	

"Fuzzing".

El Fuzzing ha sido cuantificado de igual forma que el factor de delaminación (F_d), definido como la relación entre el diámetro máximo del área delaminada y el diámetro

nominal del taladro, presentada en el Capítulo 2 a través de la *Ecuación 2.2* (Figura 3.39).

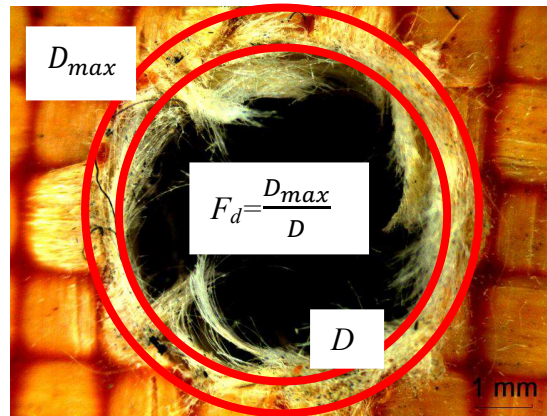


Figura 3.39. Cuantificación del daño por Fuzzing.

A pesar de que éste factor de medida no se ajusta totalmente al área dañada, supone la aproximación más empleada por los diversos investigadores por su simplicidad. Éste método de cuantificación sólo considera el defecto visible superficialmente, pudiéndose distinguir entre: de entrada y de salida. El daño a la entrada del taladro se encuentra asociado a un levantamiento de las capas que componen el material compuesto y como consecuencia a la separación de las mismas, fruto de las aristas de corte de la broca. Por el contrario, el defecto en la salida es debido a las fuerzas de corte durante el taladrado, originando un empuje de las últimas capas durante dicha operación, y como consecuencia la rotura y separación de las mismas. El defecto del material compuesto de aramida durante el taladrado está caracterizado por un Fuzzing dominante en ambas superficies, predominado por fibras sin cortar alrededor del taladro.

Resultados.

Los resultados experimentales se evaluaron en términos de fuerzas de corte, par y "fuzzing" causado en el material durante el taladrado del material compuesto. Las zonas de entrada y salida del taladro son las zonas más críticas en cuanto a daño se refiere. La zona de entrada del taladro suele estar caracterizada por una zona en forma de anillo delaminada o quemada junto con fibras rotas, mientras que, por el contrario, la zona del taladro correspondiente a la salida se caracteriza por fibras rotas y sueltas [79]. Los parámetros de corte, así como la geometría de la broca, parecen ser los más influyentes a la hora de determinar las fuerzas de corte, par y defectos en el taladro [79], siendo dentro

de éstos, el avance el más influyente [78]. El efecto de la velocidad de corte y del avance sobre el par, el empuje y la calidad del agujero, resulta ser pequeño en comparación con los efectos de la geometría de la herramienta [74].

El ángulo de punta de la herramienta tiene una gran influencia en la calidad de mecanizado de los materiales compuestos aramida/epoxi. En éste sentido, se ha encontrado que un ángulo negativo es eficaz para disminuir el daño de fuzzing durante el taladrado del material compuesto [82]. De igual forma, la fuerza de corte depende del ángulo de punta obteniéndose un máximo para 180° y una reducción para ángulos mayores que este. El par se reduce con el aumento del ángulo de inclinación, pero cambia poco al variar el ángulo de punta [74].

Se puede observar en la *Figura 3.40* los valores significativos máximos de la fuerza de corte y del par, para los parámetros de corte anteriormente planteados y las geometrías de broca ensayadas.

A la vista de los resultados se puede constatar como la geometría de la broca parece ser el parámetro más influyente sobre las fuerzas de corte, siendo los valores máximos obtenidos para la broca helicoidal un 18% mayores que aquellos conseguidos por la Brad.

En general, la velocidad de corte no parece ser un parámetro influyente en la fuerza de corte para ambas geometrías de broca, desatancando que, para velocidades bajas, las fuerzas de corte son máximas, disminuyendo dichos valores con incrementos en las mismas. Cabe destacar que, para la broca helicoidal, a velocidades elevadas, aumentos en el avance no suponen modificaciones en las fuerzas de corte.

Tras la geometría de la broca, el segundo parámetro más influyente es el avance. Se puede observar como aumentos en el avance producen aumentos en las fuerzas de corte para ambas geometrías, salvo la broca helicoidal para velocidades altas de ensayo, en cuyo caso no afecta. La máxima variación de la fuerza de corte se obtuvo para la broca helicoidal a velocidades corte de 40 m/min, dándose un aumento del 26% entre el valor mínimo y máximo de avance ensayados.

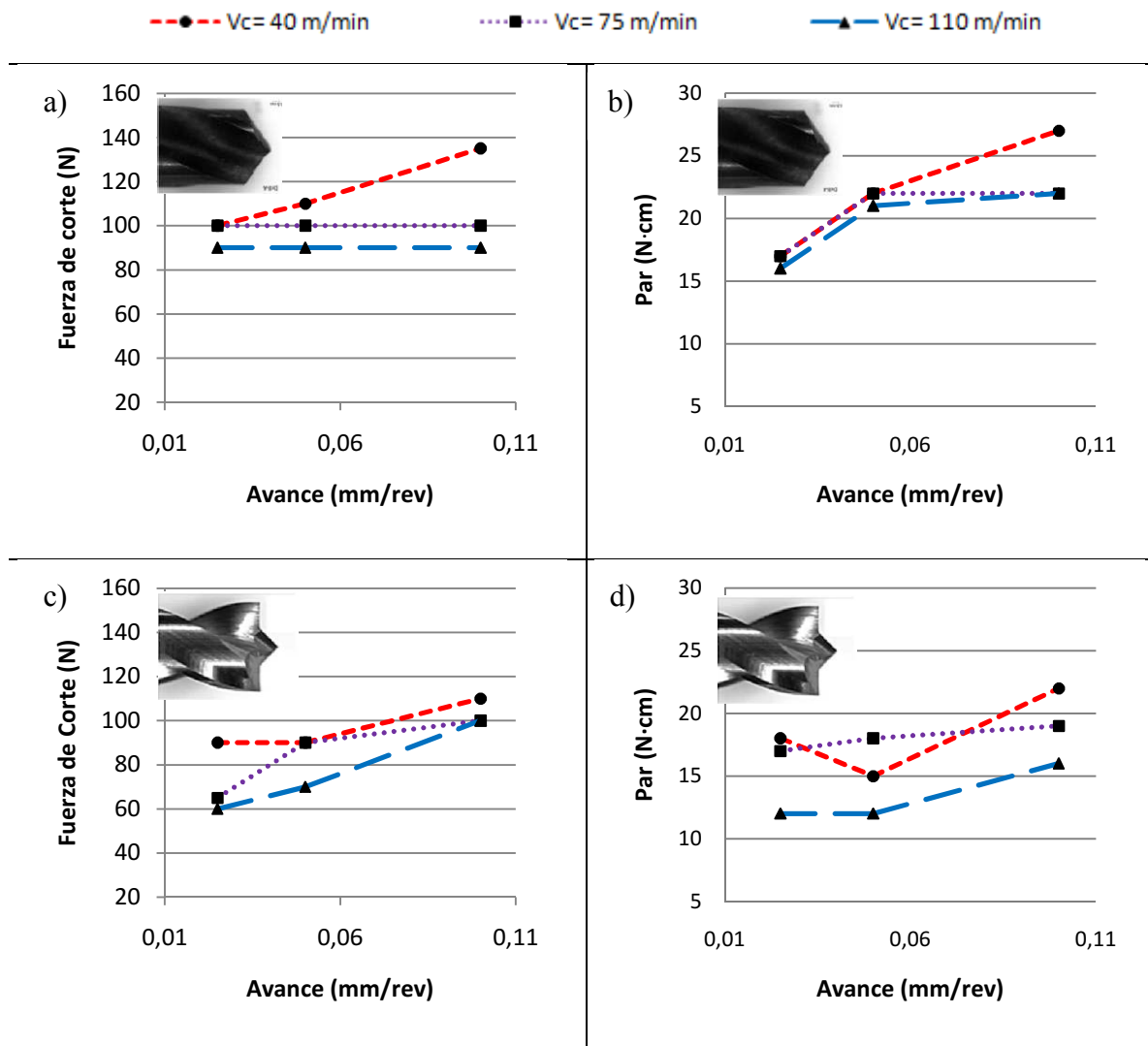


Figura 3.40. Fuerzas de corte y par con respecto al avance para la broca helicoidal (A,B) y la broca Brad (C,D) para el material compuesto a base de aramida.

En relación con el par, se puede observar cómo al igual que ocurría con el valor de las fuerzas de corte, el parámetro más influyente corresponde a la geometría de broca. En éste sentido, los valores de par máximo se obtuvieron para la broca helicoidal, siendo estos un 19% mayores a los obtenidos para la broca Brad.

Nuevamente, la velocidad de corte no parece ser en general, un parámetro muy influyente, destacando que los valores máximos de par se obtienen a velocidades de corte bajas para ambas geometrías de broca, disminuyendo con el aumento de la misma.

En general, se puede afirmar que el siguiente parámetro influyente en los valores de par obtenidos durante los ensayos es el avance, pudiéndose constatar que un aumento en el

avance produce incrementos en los valores del par. El valor máximo de variación del par, manteniendo la velocidad constante, se obtuvo para la broca helicoidal en una velocidad de 40 m/min, aumentado un 37% entre el valor mínimo y máximo del avance planteado en los ensayos.

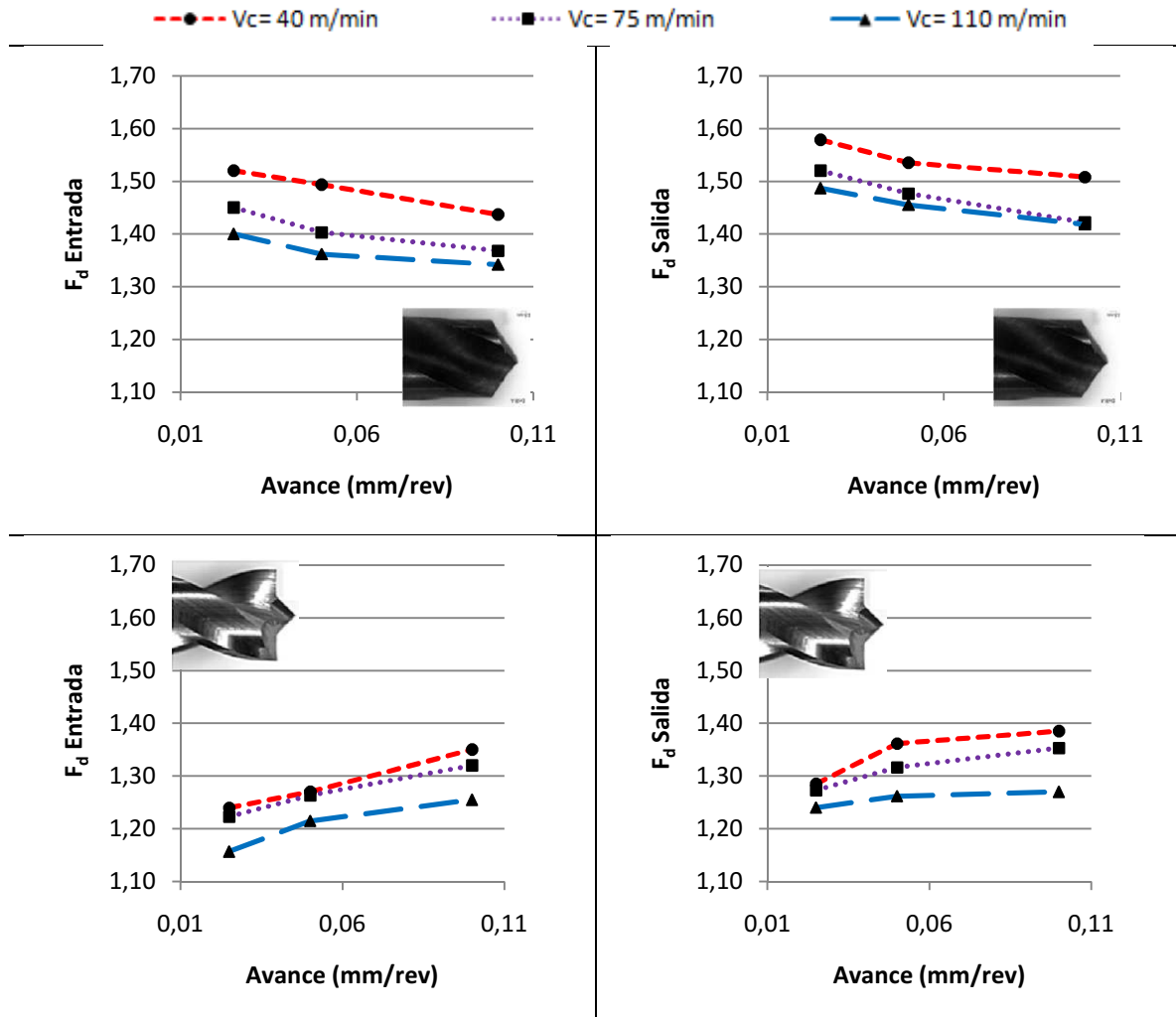


Figura 3.41. Fuzzing de entrada y de salida para las dos geometrías de broca.

En la Figura 3.41 se puede observar los resultados relativos al fuzzing en la entrada y en la salida del taladro para ambas geometrías de broca.

A tenor de los resultados, se constata nuevamente la influencia de la geometría de la broca sobre la generación de daño en el material compuesto durante el taladrado, tanto en su entrada como en la salida. En relación a la broca helicoidal, se puede observar como incrementos en el avance para todas las velocidades de corte provocan una disminución del fuzzing tanto en su entrada como en su salida. Nuevamente, se aprecia los valores

máximos para la velocidad de corte más baja y el avance más bajo, decreciendo al aumentar la velocidad de corte y el aumento. Para todo caso, el fuzzing en la salida es mayor que en la entrada, siendo el valor máximo a la salida un 10% mayor que su homólogo en la entrada. Por contra, el mejor valor se obtiene para velocidades de corte alta y avance máximo (*Figura 3.42*).

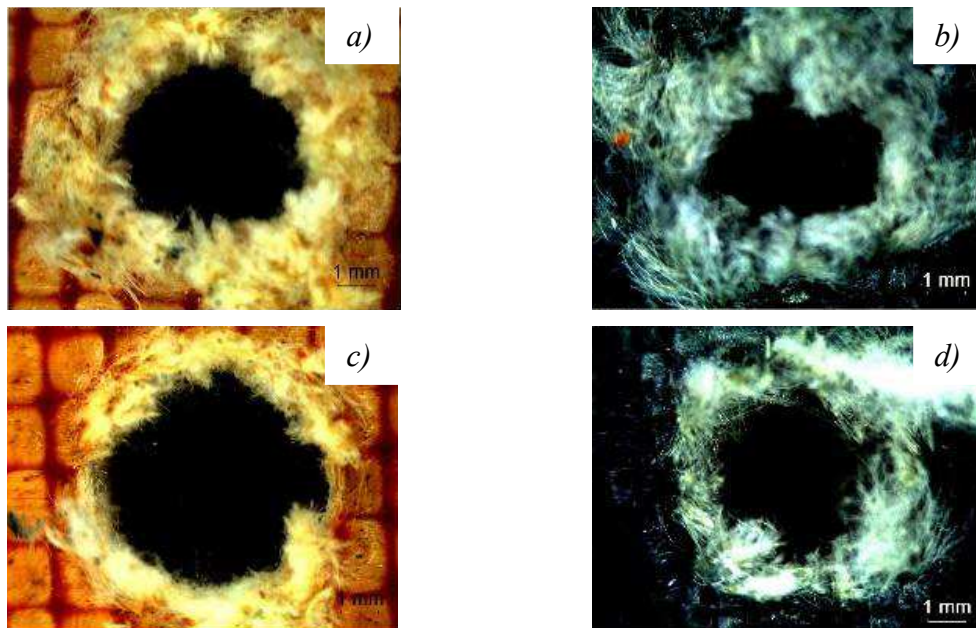
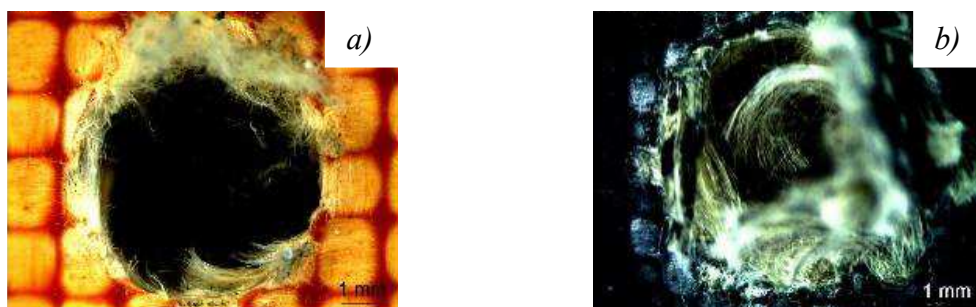


Figura 3.42. Fuzzing de entrada (a);c) y de salida (b);d) para la broca helicoidal a velocidad de corte 40 m/min y avance 0.025 mm/rev (a);b)); velocidad de corte 110 m/min y avance 0.05 mm/rev (c);d)).

Por el contrario, la broca Brad presenta incrementos en el daño con aumentos en el avance para ambas velocidades de corte tanto en la entrada como en la salida. Los valores máximos de daño se dan a las velocidades de corte más bajas y el avance más alto. Al igual que en el caso de la broca helicoidal, el fuzzing en la salida es mayor que el de la entrada, siendo el valor máximo de salida un 10% mayor que el de entrada. Sin embargo, el mejor resultado está presente en velocidades de corte altas y avances bajos (*Figura 3.43*).



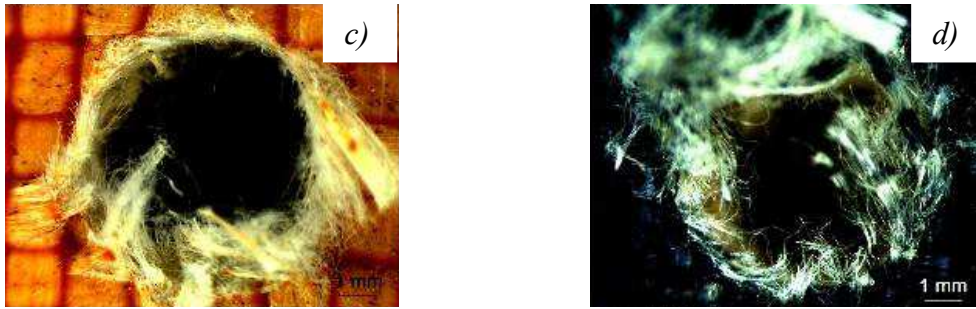


Figura 3.43. Fuzzing de entrada (a);c)) y de salida (b);d)) para la broca Brad a velocidad de corte 110 m/min y avance 0.025 mm/rev (a);b)); velocidad de corte 40 m/min y avance 0.05 mm/rev (c);d)).

Por todo ello, en términos de daño, los mejores resultados se obtienen en la entrada para velocidades de corte altas con ambas geometrías, siendo la broca Brad, la que aporta los mejores resultados.

Conclusiones Parciales.

A continuación, se resumen algunas de las conclusiones más importantes derivadas de los ensayos experimentales sobre el material compuesto de fibra de aramida:

- Se puede observar como la broca Brad es la geometría más adecuada para taladrar en material compuesto de aramida, con un avance pequeño y una velocidad de corte elevada. Además, las fuerzas de corte y par obtenidas son las menores en comparación con la geometría helicoidal.
- La broca helicoidal presenta los valores de fuerzas de corte más altos y en consecuencia la peor calidad superficial.
- En general y para ambas geometrías de broca, el daño en el material es mayor en la salida que en la entrada, obteniéndose los peores valores a velocidades de corte elevadas. Ambas geometrías estudiadas tienen tendencias contrarias, mientras que, para la broca helicoidal, el daño disminuye con el avance, para la broca Brad aumenta con el avance.

3.2.3. Fibras Naturales

Material

Los materiales compuestos biodegradables objeto de éste trabajo han sido elaborados empleando el moldeo por compresión (*Figura 3.44*). Se han empleado 4 fibras diferentes como refuerzo: yute (J); algodón con disposición 2x1 (C); lino con formato 2x1 de alta calidad (BF); y lino de calidad baja (PF) las cuales se cortaron en un formato de 150x150 mm.

Las fibras se dispusieron sin tratamiento químico previo, siendo la matriz a emplear ácido poliláctico (PLA), resina termoplástica adquirida en pellets. Se implementaron dos tipos de polímero de PLA distintos: 3260HP (PLA 3) y 10361D (PLA 10), ambos proporcionados por Nature works LLC. El uso del PLA 3260HP está enfocado al empleo en los procesos de extrusión, mientras que el PLA 10361D está específicamente diseñado para su empleo como ligante de fibras naturales. La densidad del PLA es 1.24 g/cm³ y su temperatura de fusión se encuentra dentro del rango de 145-170°C.

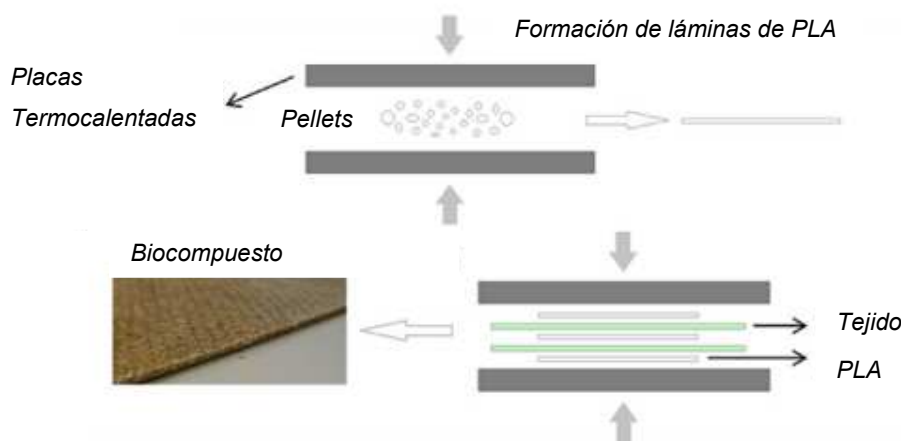


Figura 3.44. Esquema del moldeo por compresión para la fabricación de los materiales compuestos [89].

El moldeo por compresión incluye varias etapas. Primero los pellets de PLA son mantenidos en un horno a 95°C durante 4 horas, para posteriormente colocarlos entre dos placas térmicamente calentadas (185 °C) para obtener films de PLA. Posteriormente, los films de PLA son apilados alternativamente con las fibras naturales y se dejan secar

durante 30 minutos. A continuación, las capas de fibras y PLA apiladas se introducen entre las placas calientes a 185 °C, donde tras un precalentamiento de 2 minutos, se les aplica una rampa de presión máxima de 16 MPa durante 3 minutos empleando una máquina universal Servosis ME-404/100 + PCD-1065 (*Figura 3.45*). Por último, el material obtenido se deja enfriar a temperatura ambiente. Todo el material es almacenado en unas condiciones constantes de humedad relativa próximas al 46%.



Figura 3.45. Máquina Universal Servosis ME-404/100 + PCD-1065 empleada para la fabricación del material compuesto biodegradable.

Todo el material se fabricó en 2, 3 y 4 capas con el objetivo de analizar la influencia del espesor sobre el daño inducido durante el taladrado. Los materiales presentaron una proporción de refuerzo del 65% en peso, valor considerado como optimo en otros estudios [121]. Éste valor fue calculado asumiendo como constante el valor de la densidad areal en las capas de fibra natural. Se realizaron diferentes mediciones de este valor y se encontró una excelente repetibilidad. A continuación, se midió el volumen y el peso de los especímenes compuestos para encontrar la relación en peso. Se admitió una diferencia máxima del 1%, por lo que se descartaron algunos especímenes. La relación de pesos para diferentes materiales se controló usando películas de PLA con diferentes espesores.

La resistencia a tracción de cada material fabricado se ha recogido en la *Tabla 3.10*, pudiéndose encontrar más detalles concernientes a la fabricación y a las propiedades mecánicas obtenidas en la bibliografía [89].

Tabla 3.10. Resistencia a tracción y Desviación obtenida para los materiales fabricados [15].

Materiales	Resistencia a Tracción (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
BF/PLA 3	116.3	2.42
BF/PLA 10	104.0	4.71
PF/PLA 10	96.9	3.80
J/PLA 10	66.6	8.22
C/PLA 10	62.4	3.70

Geometrías de Broca y Parámetros de Corte.

Se han estudiado dos geometrías de broca HSS distintas de 3, 5 y 6 mm de diámetro para los materiales compuestos planteados: una broca helicoidal con un ángulo de punta de 118° , y una broca fabricada especialmente para este estudio con un ángulo de punta de 80° y un ángulo de hélice de 40° , ambas sin recubrimiento (Figura 3.46).

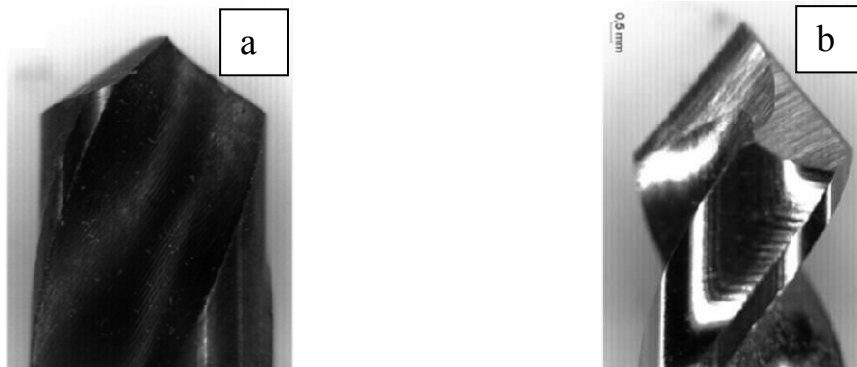


Figura 3.46. Brocas objeto de estudio. a) Broca helicoidal; b) Broca especial.

Ambas brocas son ensayadas nuevas, con objeto de evitar el efecto del desgaste fuera del análisis del presente trabajo.

Tabla 3.11 Propiedades mecánicas para el material de compuesto biodegradable.

Parámetros	Rango		
a (mm/rev)	0.03	0.06	0.12
Vc(m/min)	15	20	25

Los ensayos se llevaron a cabo en seco para evitar la contaminación del material compuesto con los fluidos de corte. No se han empleado taladros previos en ningún caso

de los planteados. Las condiciones de corte empleadas para los ensayos son las recomendadas por el fabricante (*Tabla 3.11*).

"Fraying".

La extensión del daño ha sido cuantificada en términos de factor de daño (F_d), definido en el Capítulo 2 (*Ecuación 2.2*) como el radio entre el máximo diámetro del área dañada y el área nominal correspondiente al diámetro de la broca. El área dañada se ha obtenido a partir del estudio de las imágenes tomadas con el microscopio óptico Optika SZR (*Figura 3.26.a*). El análisis del factor de daño se ha representado en la *Figura 3.47*, donde se puede observar la diferencia entre el diámetro máximo y el nominal.

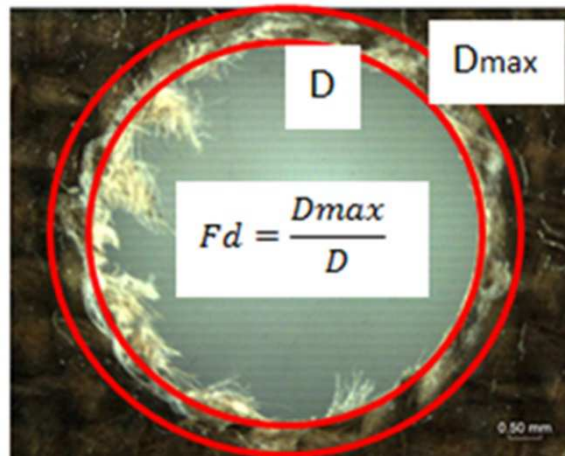


Figura 3.47. Ejemplo del cálculo del Factor de daño (F_d), encontrado el Fraying como el mecanismo de daño principal. La imagen corresponde al material compuesto a partir de yute y 10361 PLA en 2 capas, taladrado con la broca a).

Al igual que con el resto de materiales de éste estudio, el factor de daño fue evaluado a la entrada y a la salida del taladro. En la *Figura 3.47* se puede observar la rotura de las fibras originando Fraying, el cual es planteado como el fallo predominante durante el taladrado de los materiales objeto de estudio. Por el contrario, aunque la delaminación es el modo de daño característico durante el taladrado de materiales compuestos tradicionales [55], en éste caso no hay evidencia de éste fenómeno.

Al igual que el compuesto de fibra de carbono y de aramida, en el caso de los naturales se sigue la misma tendencia, según la cual, el daño a la salida asociado al empuje de la broca

en las últimas capas, es mayor que el presente a la entrada fruto de la influencia de la hélice de la broca y las fuerzas de succión consecuentes.

Resultados.

En las *Tablas 3.12, 3.13, y 3.14* se han recogido los parámetros de corte principales y los resultados de en términos de factor de daño relativos a los ensayos llevados a cabo. En éste sentido, los parámetros incluidos en el análisis son: la combinación de fibras y matrices, espesor del material compuesto, geometría y diámetro de la broca, velocidad de corte y avance. Para cada configuración se llevaron a cabo tres ensayos, obteniéndose una repetitividad excelente, siendo la desviación despreciable.

Tabla 3.12. Factor de daño (Fd) a la entrada del taladro (peel up) y salida (push out) cuantificado en cada test para cada material con 2 capas y diámetro de broca 6mm.

Fibra/Matriz	Espesor [mm]	V [m/min]	f [mm/rev]	Broca	Fd Entrada [-]	Fd Salida [-]	Test Numero
C/PLA 10	1.53	15	0.06	A	1.05	1.06	1
				B	1.04	1.05	
			0.03	A	1.04	1.05	2
				B	1.04	1.06	
		20	0.06	A	1.02	1.04	3
				B	1.03	1.05	
			0.12	A	1.02	1.03	4
				B	1.02	1.03	
		25	0.06	A	1.03	1.03	5
				B	1.02	1.04	
J/PLA 10	1.25	15	0.06	A	1.05	1.07	6
				B	1.03	1.05	
			0.03	A	1.05	1.07	7
				B	1.04	1.05	
		20	0.06	A	1.04	1.06	8
				B	1.03	1.04	
			0.12	A	1.03	1.04	9
				B	1.03	1.05	
PF/PLA 10	1.05	25	0.06	A	1.04	1.06	10
				B	1.03	1.03	
		15	0.06	A	1.07	1.08	11
				B	1.05	1.07	
		20	0.03	A	1.06	1.08	12

BF/PLA 10	1.4	20	0.06	B	1.06	1.08	13
				A	1.05	1.06	
				B	1.05	1.06	
				A	1.04	1.05	
				B	1.04	1.05	
				A	1.05	1.07	
			0.12	B	1.04	1.05	14
				A	1.05	1.07	
			0.06	B	1.04	1.05	15
				A	1.09	1.11	
		15	0.06	B	1.05	1.06	16
				A	1.07	1.08	
		25	0.03	B	1.05	1.06	17
				A	1.05	1.08	
			0.12	B	1.03	1.05	19
				A	1.04	1.06	
			0.06	B	1.03	1.04	20
				A	1.11	1.12	
BF/PLA 3	1.4	20	0.03	A	1.10	1.13	22
				A	1.09	1.10	
			0.12	A	1.05	1.08	24
				A	1.07	1.09	
		25	0.06	A	1.07	1.09	25
				A	1.07	1.09	

Tabla 3.13. Factor de daño (Fd) a la entrada del taladro (peel up) y salida (push out) cuantificado en cada test para cada material con 3 capas y diámetro de broca 6mm.

<i>Fibra/Matriz</i>	<i>Espesor</i> <i>[mm]</i>	<i>V</i> <i>[m/min]</i>	<i>f</i> <i>[mm/rev]</i>	<i>Broca</i>	<i>Fd Entrada</i> <i>[-]</i>	<i>Fd Salida</i> <i>[-]</i>	<i>Test</i> <i>Numero</i>
<i>BF/PLA 10</i>	2.14	20	0.06	<i>A</i>	<i>1.05</i>	<i>1.08</i>	26
				<i>B</i>	<i>1.04</i>	<i>1.05</i>	
<i>C/PLA 10</i>	2			<i>A</i>	<i>1.03</i>	<i>1.05</i>	27
				<i>B</i>	<i>1.03</i>	<i>1.04</i>	

Tabla 3.14. Factor de daño (Fd) a la entrada del taladro (peel up) y salida (push out) cuantificado en cada test para cada material con 4 capas.

<i>Fibra/Matriz</i>	<i>Espesor</i> <i>[mm]</i>	<i>Ø</i> <i>[mm]</i>	<i>V</i> <i>[m/min]</i>	<i>f</i> <i>[mm/rev]</i>	<i>Broca</i>	<i>Fd</i> <i>Entrada</i> <i>[-]</i>	<i>Fd</i> <i>Salida</i> <i>[-]</i>	<i>Test</i> <i>Numero</i>
<i>BF/PLA 10</i>	2.68	6	20	0.06	<i>A</i>	1.06	1.11	28
					<i>B</i>	1.04	1.06	
<i>C/PLA 10</i>	2.85				<i>A</i>	1.04	1.08	29
					<i>B</i>	1.04	1.06	

BF/PLA 10	2.68	5	A	1.06	1.11	30
C/PLA 10	2.85		A	1.04	1.07	31
BF/PLA 10	2.68	3	A	1.06	1.10	32
C/PLA 10	2.85		A	1.03	1.06	33

Se puede observar una tendencia general: el daño en la salida es mayor que el daño en la entrada en todos los ensayos. Dichos resultados concuerdan con la bibliografía estudiada en relación con el taladrado de material compuesto de fibra de carbono. Davim et al. [32] justificó éste fenómeno a través de la compresión a la que se ve sometida la placa, y por consiguiente altos valores de fuerza, durante el taladrado. Los resultados obtenidos para la broca B mostraron un factor de daño menor en comparación con la broca A, debido fundamentalmente al menor ángulo de punta de la broca B. Los valores altos del ángulo de punta están relacionados normalmente con incrementos en las fuerzas de corte, así como aumentos en la delaminación presente a la salida del taladro, durante el taladrado de materiales compuestos convencionales [30, 122].

Hay claras diferencias entre los resultados mostrados en las *Tablas 3.12, 3.13 y 3.14* con respecto a la *Tabla 2.5*, correspondiente a los estudios existentes relativos a otros autores a cerca del taladrado de materiales compuestos con matrices no biodegradables. El factor de daño obtenido durante el taladrado en éste trabajo en relación a dichas investigaciones es mucho menor. Por otro lado, cabe destacar que el segundo mecanismo de daño es la delaminación.

Velocidad de Corte.

La velocidad de corte se analiza a través de la comparación de los resultados de los ensayos 1, 3, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 20, 21, 23 y 25 recogidos en la *Tabla 3.12*. Éstos ensayos se han realizado sobre material compuesto de 2 capas, taladrados con una broca de diámetro 6 mm y una velocidad constante de 0.06 mm/rev.

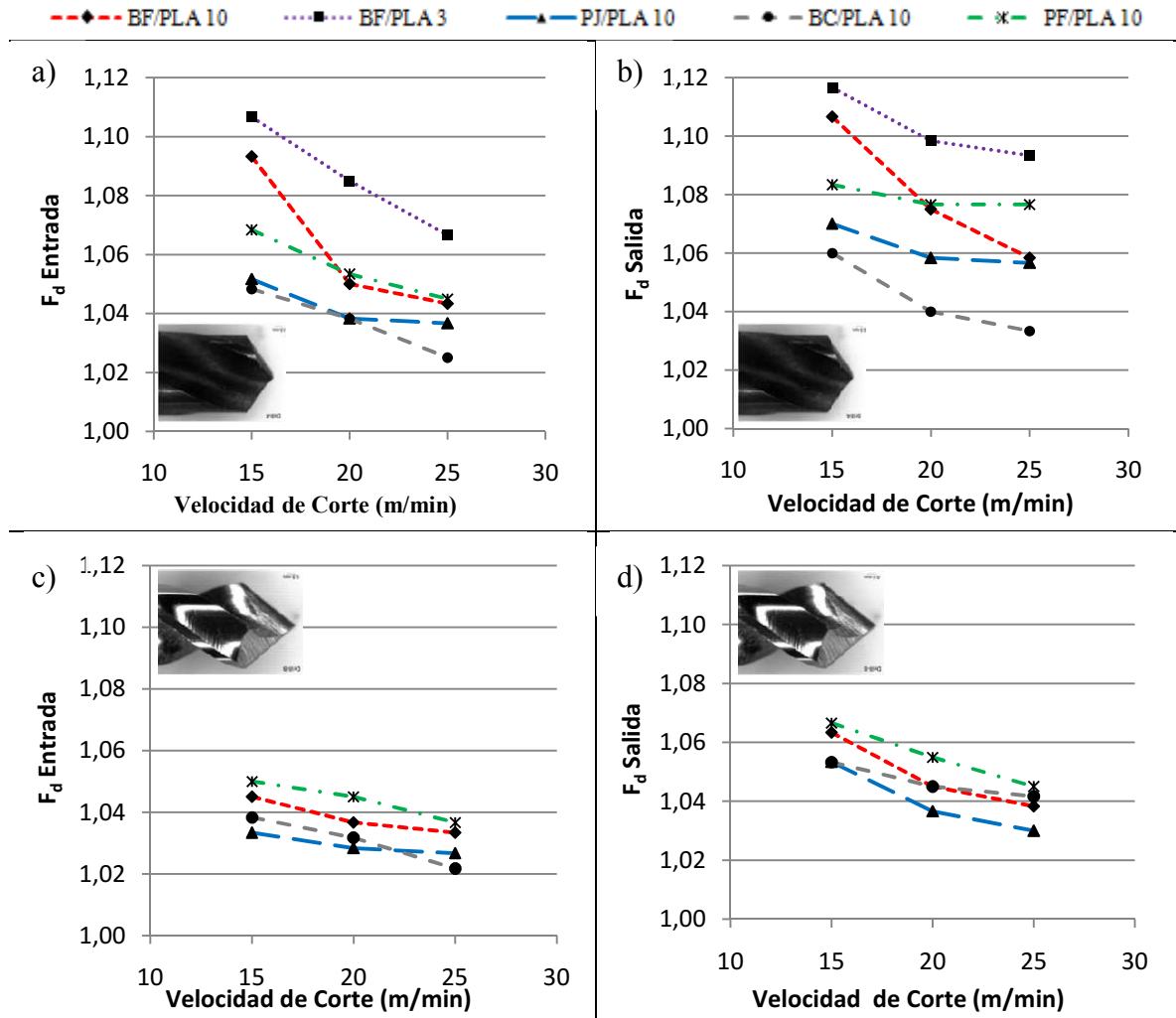


Figura 3.48. Factor de daño vs velocidad de corte para todos los materiales compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10). a) y b) daño a la entrada y salida obtenido con la broca A; c) y d) daño a la entrada y salida obtenido con la broca B.

El factor de daño tanto a la salida como a la entrada para los diferentes compuestos elaborados se ha recogido y relacionado con la velocidad de corte en la *Figura 3.48* teniendo en cuenta las distintas geometrías de broca. Se puede observar una tendencia general para todos los casos ensayados: el daño decrece con la velocidad de corte. Ésta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por Nasir et al. [105] durante el taladrado de material compuesto a base de lino/epoxy. Sin embargo, esta tendencia resulta diferente de aquella observada en los materiales compuestos convencionales, donde el efecto de la velocidad de corte es mucho menor que la influencia debida al avance. Además, en estudios recientes de diferentes autores, se ha constatado la influencia de la geometría de la broca sobre la delaminación en CFRPs al relacionarla con la velocidad de corte, siendo insignificante o significativa para diferentes configuraciones

de broca [2, 122]. En ésta línea, el material compuesto BF/PLA10 muestra la mayor variación de daño inducido en función de la velocidad de corte al ser procesado con la geometría de broca A. Éste efecto se puede atribuir a una mayor influencia de la deformación plástica en el comportamiento mecánico de este compuesto [123].

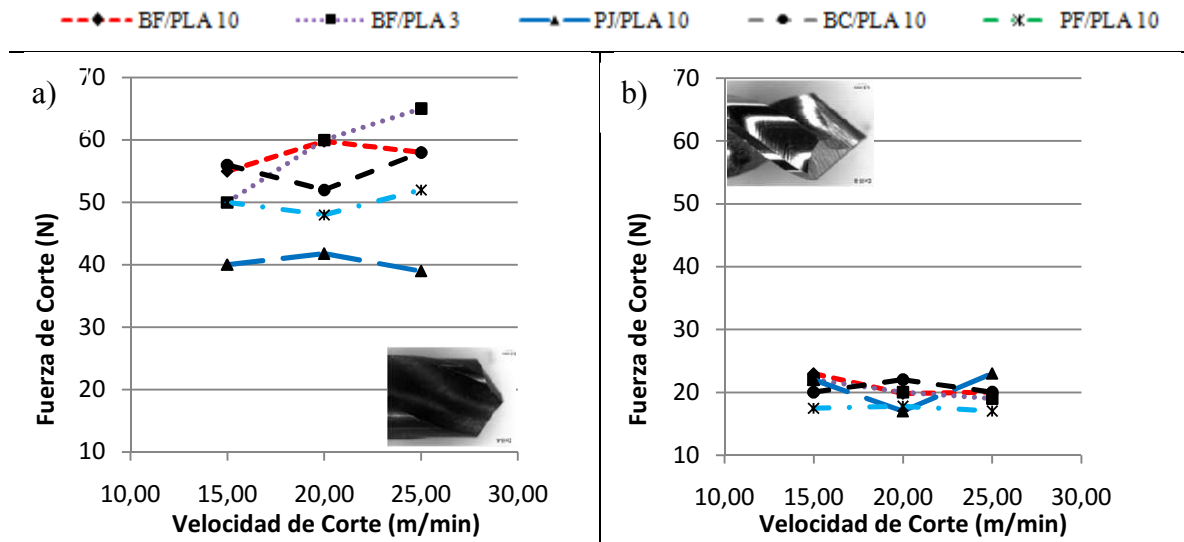


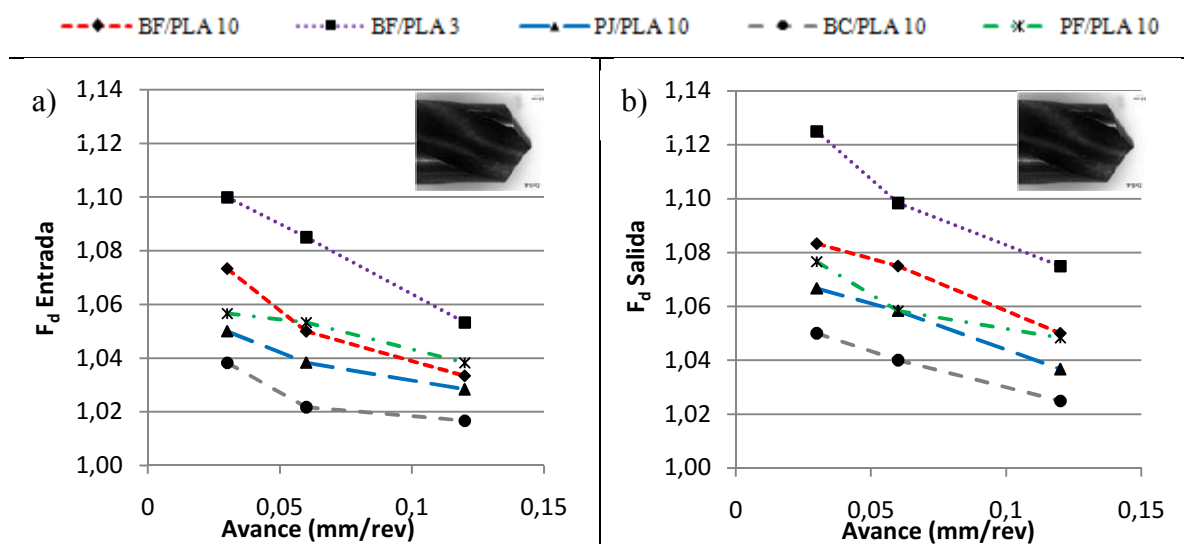
Figura 3.49. Fuerzas de corte vs velocidad de corte para todos los compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10), a) broca A, b) broca B.

La Figura 3.49 muestra las fuerzas de corte en función de la velocidad de corte para todos los casos analizados. La fuerza de corte generada por la broca A fue mayor que la obtenida por la broca B en todos los ensayos planteados, debido fundamentalmente al mayor ángulo de punta de la broca A (118°) en comparación con la broca B (80°). En consecuencia, se puede recomendar un ángulo de punta menor para el mecanizado de material compuestos biodegradables en los que se busque unas fuerzas de corte moderadas (la misma circunstancia fue constatada para materiales compuestos convencionales). Sin embargo, la influencia de la velocidad de corte sobre las fuerzas de corte se encontró insignificante, aunque la Figura 3.48 muestre una clara influencia de la misma sobre el factor de daño. Éste hecho es debido a que la naturaleza del daño evaluado, consistente principalmente en Fraying, decrece con la velocidad de corte debido a que la calidad de corte aumenta con velocidades de corte elevadas. Sin embargo, en los materiales compuestos convencionales el modo de daño predominante es la delaminación y el efecto de las fuerzas de corte está directamente ligado al daño.

Velocidad de Avance.

La influencia del avance fue estudiada mediante la comparación de los resultados de los ensayos 2-4, 7-9, 12-14, 17-19 y 22- 24 en la *Tabla 3.12*. Estos ensayos se llevaron a cabo sobre compuestos fabricados en 2 capas, taladrados con un diámetro nominal de broca de 6mm, con velocidad de corte constante e igual a 20 m/min.

En la *Figura 3.50* se puede observar el daño en la entrada y en la salida del taladro en función del avance, para los distintos tipos de compuestos analizados. Se puede constatar como el daño inducido decrece con aumentos en el avance, sin embargo, ésta tendencia choca con los resultados encontrados en la bibliografía, y según los cuales, el daño inducido durante el taladrado aumenta con incrementos en el avance para el material compuesto de fibra de carbono [26, 32, 55], el compuesto a base de sisal/poliéster [98] y el compuesto a base de lino/epoxy [103]. Ésta tendencia contraria está relacionada con los distintos modos de fallo, mientras que diversos autores encontraron la delaminación como el modo de fallo predominante en el taladrado del material, en éste estudio, se ha encontrado el Fraying como el principal. Se realizaron ensayos no destructivos utilizando la inspección ultrasónica C-Scan con el objetivo de confirmar que no se indujo la delaminación durante los ensayos de taladrado.



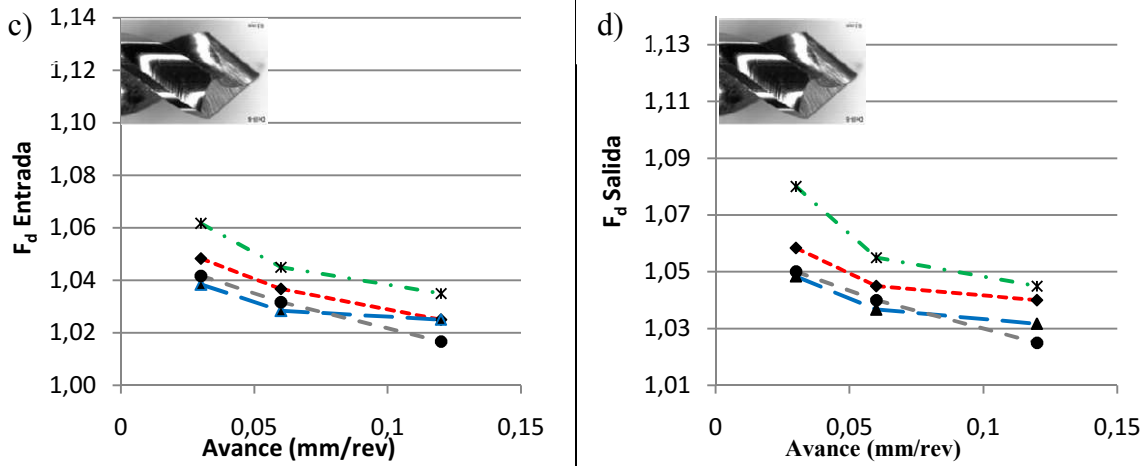


Figura 3.50. Factor de daño vs velocidad de avance para todos los materiales compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10). a) y b) daño a la entrada y salida obtenido con la broca A; c) y d) daño a la entrada y salida obtenido con la broca B.

De igual forma, es bien conocida la enorme influencia de la velocidad de deformación para los materiales compuestos biodegradables sobre las propiedades mecánicas [123]. El incremento significativo de la rigidez de los biocompuestos con la velocidad de deformación puede explicar el aumento del comportamiento frágil a altas velocidades de avance.

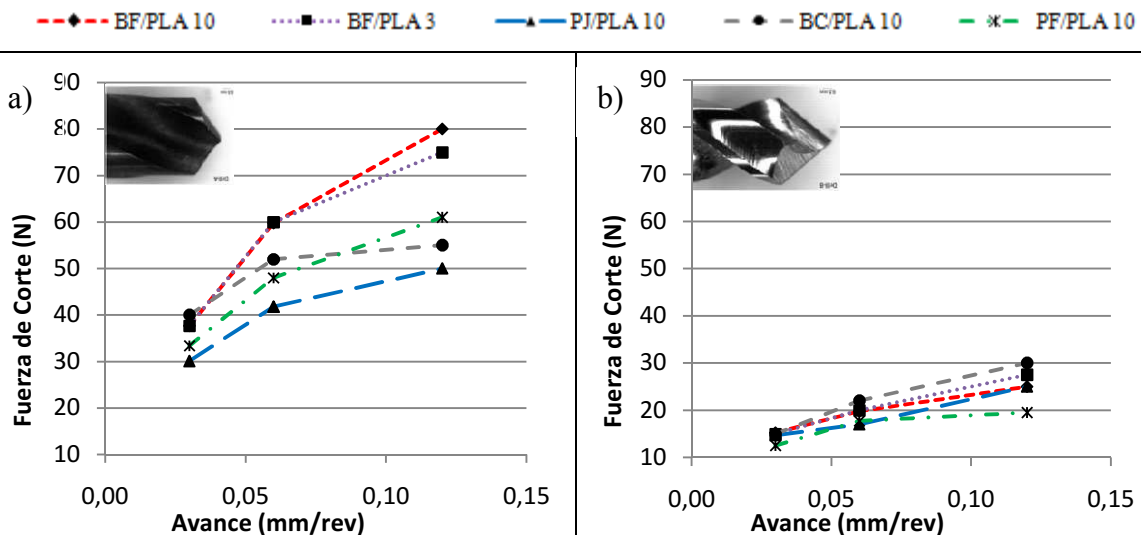


Figura 3.51. Fuerzas de corte vs avance para todos los materiales compuestos analizados (BF/PLA10, BF/PLA3, PJ/PLA10, BC/PLA10, PF/PLA10). a) broca A, b) broca B

Las fuerzas de corte en función del avance se han representado en la Figura 3.51. Se puede observar como las fuerzas de corte aumentan con el avance. En todos los casos, las

fuerzas de corte inducidas por la broca A fueron superiores a las obtenidas durante el taladrado con la geometría de broca B. Como se explicó anteriormente para el estudio de la velocidad de corte, éste hecho se debe fundamentalmente al mayor ángulo de punta presente en la broca A, y que produce menores valores de fuerzas de corte independientemente del avance.

Para entender mejor que ocurre en la pared del taladro, las muestras taladradas se observaron empleando SEM-EDS a través de un corte transversal a lo largo del orificio del taladro, con el objetivo de analizar si el daño generado en la pared del mismo dependía del avance. En ésta línea, se puede observar como para todos los materiales, la calidad de la superficie del taladro aumenta con el avance. La *Figura 3.52* muestra un ejemplo de la calidad de la pared del taladro para el biocompuesto, fabricado a base de lino (BF) y PLA 10361D (PLA 10), taladrado con la geometría de la broca A, una velocidad de corte de 20m/min, y un avance de 0.03 (*Figura 3.52.a*) y 0.12 (*Figura 3.52.b*) mm/rev respectivamente. Se puede observar claramente el aumento de la calidad en la pared del taladro con incrementos en el avance.

El taladrado de materiales compuestos convencionales requiere valores de avance bajos, mientras que en el caso de los materiales compuesto biodegradables pueden ser taladrados con avances más altos, lo cual contribuye a una mejor calidad superficial del taladro. Dichos resultados pueden ayudar a reducir el tiempo de corte, y, en consecuencia, el consumo de energía y coste de la operación de taladrado sobre biocompuestos.

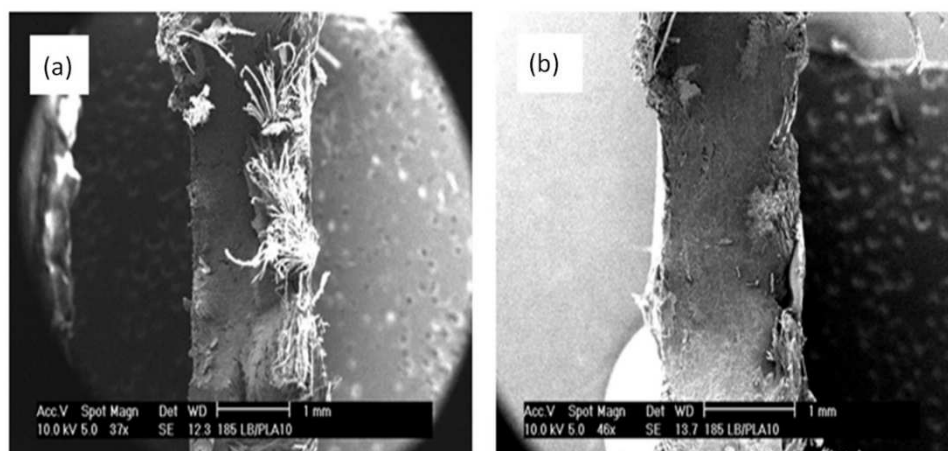


Figura 3.52. Imagen SEM-EDS de la sección transversal del taladro (biocompuesto a base de lino (BF) y PLA 10361D en 2 capas), taladrado con la broca A a una velocidad de corte de 20 m/min y un avance de 0.03 mm/rev (a) y 0.12 mm/rev (b)) respectivamente.

Diámetro de la broca.

El diámetro de la broca se analizó a través de la comparación de los resultados obtenidos de los ensayos 28-33. Se ensayaron dos materiales distintos de 4 capas: algodón (BC) y lino (BF) combinado con PLA 10361D como matriz. Ambos materiales fueron taladrados con la broca A y tres diámetros de broca diferentes: 3, 5 y 6 mm respectivamente. La velocidad de corte y el avance se mantuvieron constantes y de valor 20 m/min y 0.06 mm/rev respectivamente.

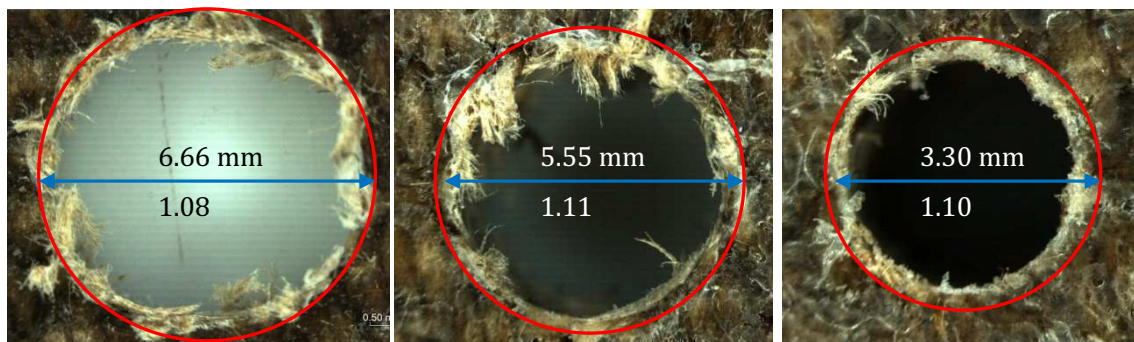


Figura 3.53. Calidad del taladro en términos de factor de daño en la salida, para el biocompuesto a base de lino (BF), taladrado con la broca A de diámetros 3, 5 y 6 mm.

En la *Figura 3.53* se puede observar como el daño producido en la salida aumenta en términos absolutos con el diámetro de la broca durante el taladrado de los materiales compuestos biodegradables reforzados con fibras de lino. Sin embargo, el factor de daño (relación entre el diámetro nominal y el diámetro de daño) es similar (alrededor a 1.1) en el rango de diámetros analizados. Resultados similares se obtuvieron cuando se analizó el daño a la entrada en el caso de biocompuestos a base de fibras de algodón (*Figura 3.54*). Tanto el daño a la entrada como a la salida aumentan significativamente con el diámetro de la broca en términos absolutos, sin embargo, el factor de daño es similar. En consecuencia, la influencia de diámetro de la broca puede ser considerada como mínima en comparación con la influencia de otros parámetros de corte como el avance o la velocidad de corte.

Espesor del material compuesto biodegradable.

La influencia del espesor del biocompuesto sobre el daño resultante se analizó para las fibras de algodón (BC) y lino (BF) con PLA 10361D como matriz, siendo ambos fabricados en 2, 3 y 4 capas, y taladrados con la broca A y B de diámetro igual a 6 mm. Tanto la velocidad de corte como el avance se mantuvieron constantes en 20 m/min y 0.06 mm/rev respectivamente. La relación de ensayos para éste estudio se nombró como 3, 13, 26-29 en la *Tabla 3.12*.

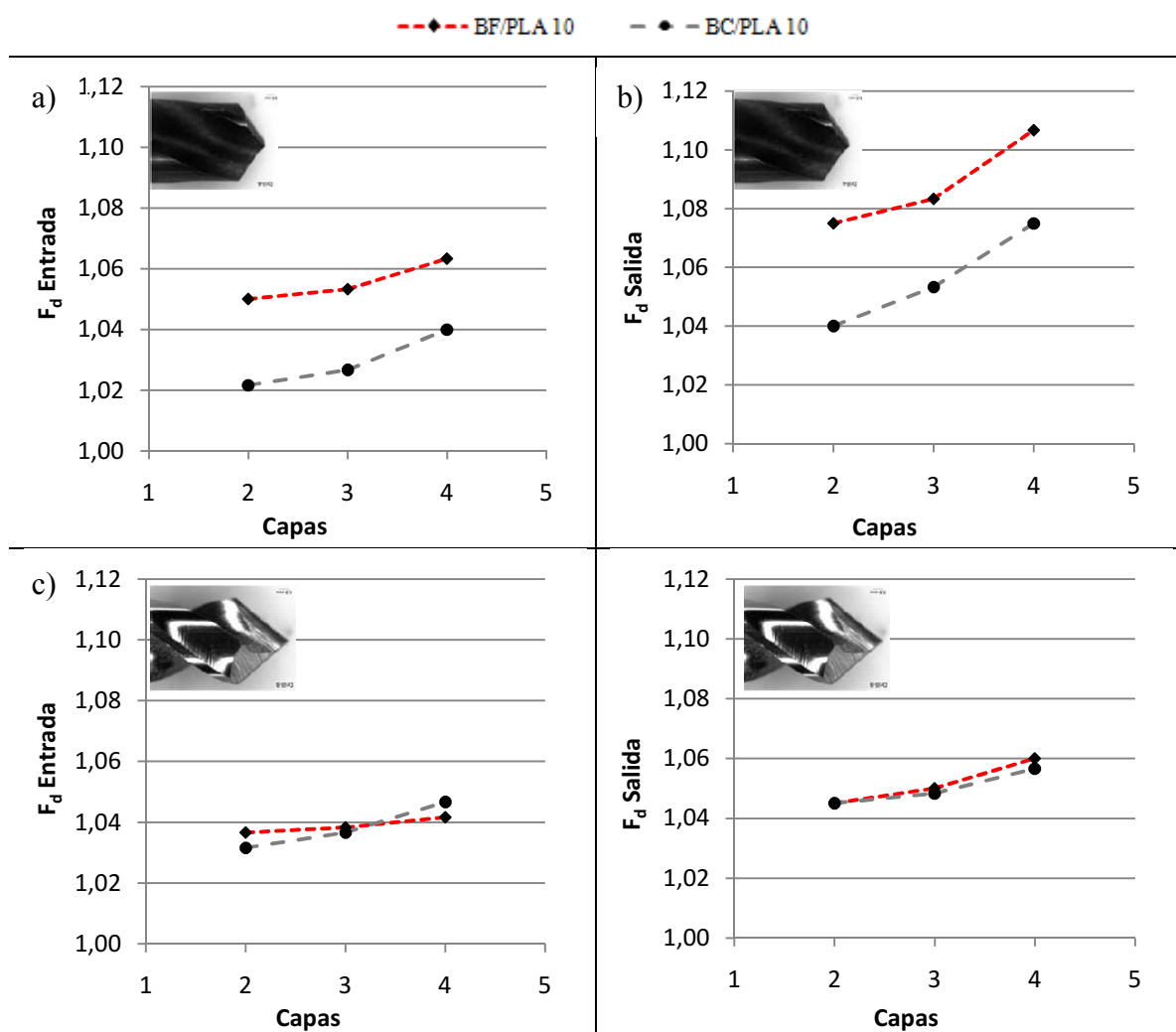


Figura 3.54. Factor de daño vs número de capas para el compuesto BF/PLA10 y BC/PLA10. a) y b) daño a la entrada y salida obtenido con la broca A; c) y d) daño obtenido a la entrada y salida con la broca B.

Geometría de la broca.

Los análisis descritos en las secciones previas, han demostrado que en general el daño inducido por la broca B (80°) se muestra menor que el producido por la broca A (118°). Ésta circunstancia es debida al menor valor del ángulo de punta, también relacionado con la disminución de la extensión del daño en los materiales compuestos convencionales, pudiendo resaltar como ejemplo el trabajo de Feito et al. [2].

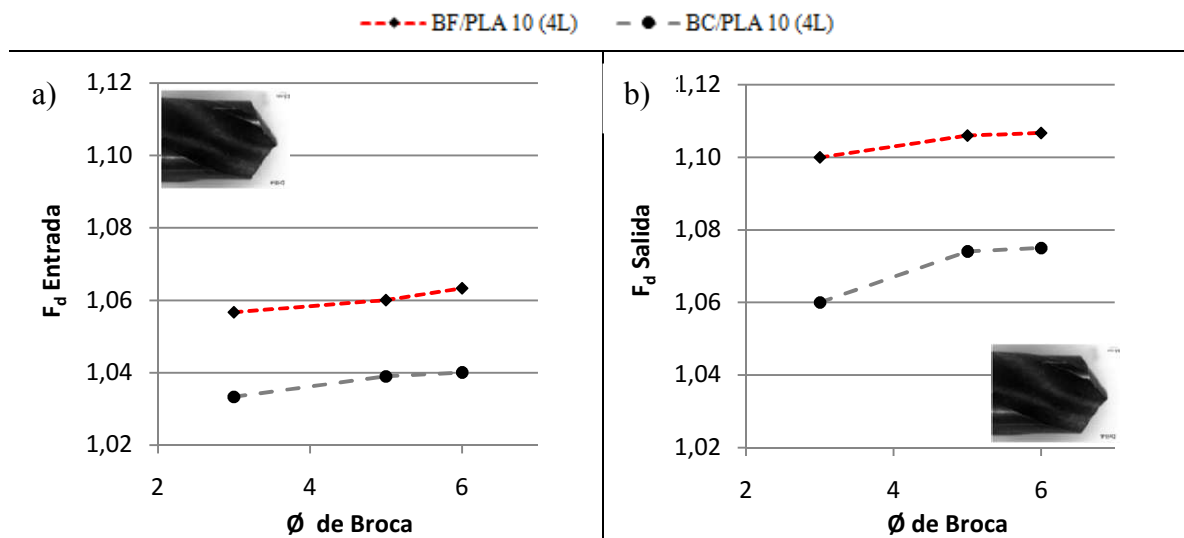


Figura 3.55. Factor de daño a la entrada y la salida vs diámetro de la broca (broca A). Lino (BF) y algodón (BC) con PLA10 como matriz.

La Figura 3.48 muestra como el daño inducido por la broca A es mayor que la obtenida con la broca B para los distintos materiales y velocidades de corte. Sin embargo, la sensibilidad a la generación del daño en relación al ángulo de punta no es el mismo para todos los materiales objeto de estudio, dependiendo la misma de la naturaleza del refuerzo. En el caso de los biocompuestos reforzados con fibra de lino, el factor de daño se redujo de 1.11 a 1.06 cuando se taladró con la broca B en lugar de con la broca A. Por otro lado, la reducción del factor de daño en los biocompuestos reforzados con fibra de algodón es prácticamente despreciable.

Los resultados mostrados en la Figura 3.55 confirman que el factor de daño se reduce con el empleo de la broca B para todos los materiales y avances estudiados. La Figura 3.54 muestra que la broca A conduce a un factor de daño inducido mayor para los distintos espesores, demostrando con ello la importancia de seleccionar la geometría de la

broca adecuada con objeto de minimizar la extensión del daño. La selección de un ángulo de punta bajo puede ayudar a obtener mejores resultados sin incrementar el coste o el consumo de energía durante el procesado.

Tipo de material compuesto biodegradable.

La *Figura 3.56* muestra una comparación del daño a la salida producido sobre los cinco materiales analizados fabricados en 2 capas: lino y PLA 3260HP como matriz (BF/PLA 3); lino y PLA 10361D como matriz (BF/PLA 10); lino de calidad baja (PF/PLA10); yute (PJ/PLA10); y algodón (BC/PLA10). Estos ensayos se han reflejado en la *Tabla 3.12* como: 5, 10, 15, 20 y 25; y han sido realizados a una velocidad de corte y avance constante de 20 m/min y 0.06 mm/rev respectivamente.

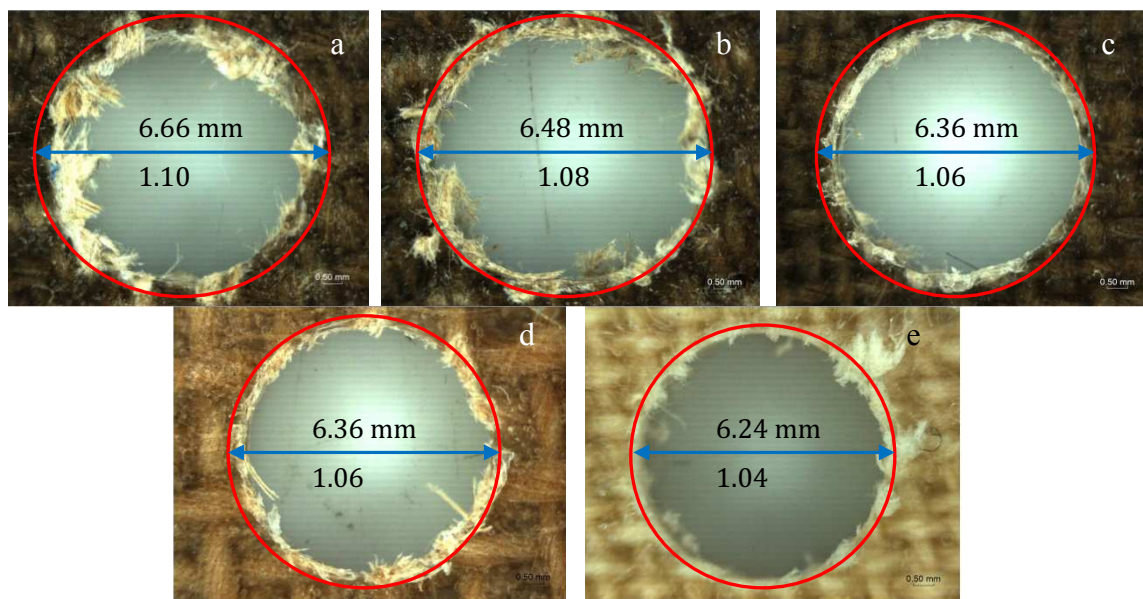


Figura 3.56. Daño inducido a la salida, obtenido con la broca A (2 capas, 20 m/min de velocidad de corte, 0.06 mm/rev de avance) en los cinco biocompuestos analizados: a) lino con PLA 3260HP (BF/PLA 3); b) lino con PLA 10361D (BF/PLA 3); c) lino de baja calidad (PF/PLA10); d) yute (PJ/PLA10); e) algodón (BC/PLA 10).

El menor valor del factor de daño se ha encontrado para el caso del biocompuesto a base de fibras de algodón, mientras que el valor máximo se constató para el lino (BF) y matriz de PLA 3260HP. La influencia del material de la fibra sobre el factor de daño, puede relacionarse con la resistencia a tracción de los biocompuestos, encontrándose una relación inversa entre las mismas (*Tabla 3.12*). Los materiales compuestos basados en fibras de lino muestran mayores valores de resistencia a tracción, así como mayores

valores de daño. Dicha relación puede explicarse considerando que una mayor resistencia a la tracción deriva en unas mayores fuerzas de corte, y, consecuentemente, si las fuerzas de corte aumentan, existe un aumento del factor de daño. Sin embargo, el daño inducido durante el taladrado puede también estar influenciado por la interacción entre el PLA y las diferentes fibras naturales empleadas como refuerzo.

El daño inducido durante el taladrado es menor en los biocompuestos a base el algodón y yute, debido fundamentalmente a la menor resistencia a tracción. Sin embargo, se han encontrado diferentes resultados cuando se comparan el daño a la salida y a la entrada. En el caso del daño inducido a la entrada, éste, fue menor para las fibras de algodón que para las de yute (*Figura 3.48 y 3.50*), mientras que para el daño a la salida ésta tendencia se invierte, siendo el yute menor.

En lo relativo a la influencia de la matriz, el factor de daño sobre los compuestos fabricados con PLA 101361D, teniendo en cuenta tanto el daño a la entrada como a la salida, es menor en comparación con el obtenido para los bio fabricados con PLA 3260HP. En la *Figura 3.57* se puede observar la comparación entre el daño producido en un biocompuesto fabricado a partir de PLA 3260HP y 10361D como matriz y refuerzo de lino. Cabe destacar que el polímero 10361D está especialmente diseñado como aglutinante de fibras naturales, y proporciona una mejor interfaz de cohesión entre fibras y matriz, lo que deriva en un menor daño del compuesto durante el mecanizado.

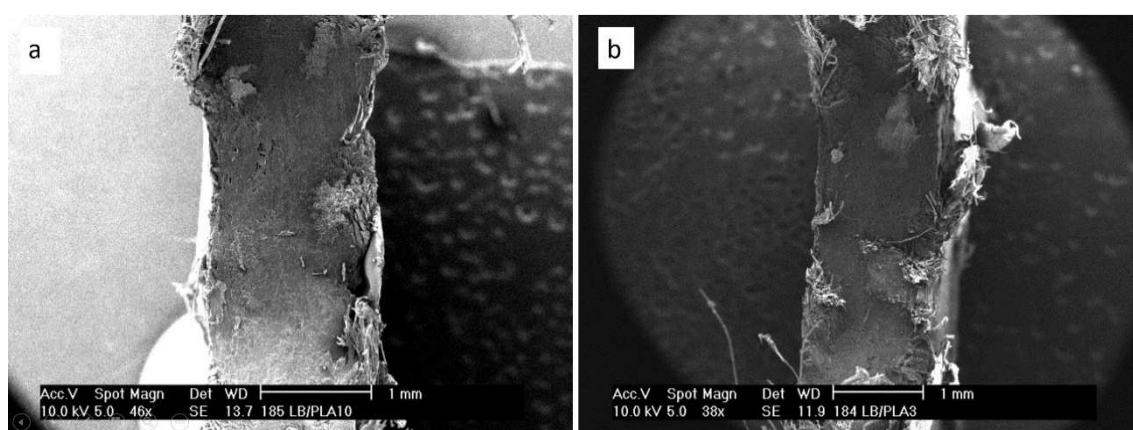


Figura 3.57. Imagen (SEM-EDS) de la sección transversal del taladro sobre biocompuesto de fibra de lino (BF) en 2 capas, taladrado con la broca A, a velocidad de corte de 20 m/min y avance de 0.12 mm/rev; con matriz de: a) PLA 10361D y b) PLA 3260HP.

Conclusiones Parciales.

A continuación, se reúnen y detallan algunas de las conclusiones principales obtenidas durante el taladrado de materiales compuestos biodegradables:

- Se ha encontrado que la extensión del daño decrece cuando tanto la velocidad de corte como el avance aumentan. Ésta circunstancia puede estar relacionada con el aumento de la rigidez del biocompuesto con la velocidad de deformación, lo que a su vez explica un comportamiento más frágil para un avance y velocidad de corte altas, conduciendo a una rotura más limpia de la fibra, y, en consecuencia, la disminución del Fraying.
- La influencia de la velocidad de corte sobre las fuerzas de corte se ha encontrado despreciable, aunque la velocidad de corte influyó en el daño inducido. Éste hecho está relacionado con la naturaleza del daño (mayoritariamente Fraying), el cual decrece con la velocidad de corte debido a la generación de un corte más limpio a velocidades altas.
- Las fuerzas, como era de esperar, aumentan con el avance. Para todos los casos, las fuerzas de corte inducidas por la broca A son mayores que aquellas obtenidas con la broca B. Ésta circunstancia, está relacionada con el mayor ángulo de punta de la broca A, lo cual estriba en menores valores de la fuerza de corte independientemente del avance. Se ha encontrado al ángulo de punta de la herramienta como un parámetro de influencia significativa: cuanto menor sea el tamaño del ángulo de punta, menor es la extensión del daño.
- Mientras que el espesor de la muestra presenta influencia sobre la extensión del daño, la influencia del diámetro de la broca se puede considerar despreciable.
- La extensión del daño depende del tipo de fibra. El daño inducido durante el taladrado se ha encontrado menor para el compuesto basado en fibras de algodón y yute debido a su menor resistencia a la tracción. La matriz basada en el polímero 10361D, recomendada para fibras naturales debido a la mejor cohesión

de la interfaz, presenta una reducción en el Fraying cuando se compara con el polímero 3260HP.

CAPÍTULO 4: Modelización numérica

4.1.INTRODUCCIÓN.

Como se ha expuesto en el Capítulo 3 de éste documento, el comportamiento de los materiales compuestos de fibras naturales frente al taladrado es diferente del comportamiento de los materiales compuestos tradicionales. De igual forma, y como se ha podido extraer de los ensayos experimentales, la tendencia del daño en función del avance para el material compuesto a base de fibras naturales (el daño disminuye al aumentar el avance), es contraria al obtenido para el resto de fibras estudiadas, siendo necesario estudiar dicha tendencia a través de su modelización. Es por ello, que el taladrado de materiales compuestos de fibras naturales y su posible daño durante el mismo puede ser considerado más desconocido que el relativo a las demás fibras estudiadas (carbono y aramida). Con objeto de poder comprobar la hipótesis de que ésta tendencia ocurre porque el material compuesto de fibras naturales tiene un comportamiento viscoelastoplástico, en éste capítulo se ha desarrollado un modelo numérico que reproduzca el proceso de taladrado sobre dicho material.

La modelización numérica basada en el método de elementos finitos, tiene como objetivo principal el desarrollo de modelos que posibiliten la simulación de los procesos reales, permitiendo de este modo entender el proceso de taladrado, los principales mecanismos de daño, así como los parámetros más influyentes en la generación del mismo.

La modelización del proceso de taladrado en 2D no es posible en este caso, ya que las geometrías complejas de la broca, así como el corte oblicuo, y la necesidad de cuantificar el daño generado en el proceso de taladrado, hacen necesarios la modelización numérica en 3D. Pese a todo, casi toda la literatura referente a la modelización de procesos de mecanizado se ha basado en modelos 2D.

El uso de modelos numéricos 3D es relativamente reciente, debido principalmente a la mejora de las capacidades de cálculo de los ordenadores actuales, posibilitando una simulación del proceso real con un mayor grado de realismo. El empleo de éste tipo de modelos resulta obligado en simulaciones de procesos reales donde la geometría de la herramienta es compleja o el corte es oblicuo (presente habitualmente en los procesos industriales). La principal desventaja de ése tipo de modelos estriba en el elevado tiempo de cálculo necesario para llevar a cabo la simulación.

En el siguiente apartado de éste capítulo se ha definido el modelo de comportamiento, sus ecuaciones constitutivas, así como la calibración posterior. De igual forma, se han establecido las leyes de comportamiento mecánico del material ensayado experimentalmente.

En el tercer apartado se han planteado los distintos ensayos a modelizar, los cuales, posteriormente se validaron a través de los ensayos experimentales. Además, se han definido las geometrías de broca y material modelizadas, el contacto, las condiciones de contorno y el mallado empleado durante la simulación del proceso de taladrado.

A continuación, en el siguiente apartado, se ha realizado la validación del modelo a partir de las fuerzas obtenidas en los ensayos reales, y en las condiciones (velocidad de corte y avance) simuladas. Los principales resultados, así como las principales aportaciones derivadas de los mismos en relación a la modelización del proceso de taladrado se han resumido en el quinto apartado.

Por último, en el sexto apartado, se ha detallado y presentado las conclusiones principales obtenidas de la modelización del proceso de taladrado.

Como ya se ha planteado en los capítulos iniciales de ésta Tesis, existe literatura relativa al taladrado de materiales compuestos a base de fibra de carbono y aramida, sin embargo, la literatura relativa al proceso de taladrado sobre material compuesto 100% biodegradable es casi inexistente. Por todo ello, la simulación del proceso de taladrado se ha centrado sobre las fibras naturales, y más concretamente sobre el lino, debido fundamentalmente, a que es un material fabricado y caracterizado en el ámbito del departamento (se posee mucha información relativa al mismo), así como, el más estudiado dentro de las fibras naturales planteadas en éste estudio.

4.2.MODELO CONSTITUTIVO

Como se ha descrito en los anteriores apartados, el comportamiento viscoelastoplástico observado en los ensayos, hace necesario el empleo de un modelo constitutivo que reproduzca la influencia de la velocidad de deformación.

4.2.1. Resultados de ensayos

Con idea de determinar el comportamiento del material y de éste modo poder introducirlo en ABAQUS se realizaron ensayos de tracción a distintas velocidades de deformación.

La *Figura 4.58* muestra las curvas tensión-deformación obtenidas a velocidades de deformación de $2,08 \times 10^{-4}$ a $8,33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, donde se puede observar una influencia significativa de la velocidad de deformación. Se puede comprobar cómo aumentos en la velocidad de deformación generan aumentos en la rigidez y la resistencia del material, mientras que, por el contrario, la deformación máxima disminuye. El comportamiento mecánico es claramente no lineal, algo característico de los materiales compuestos de fibras naturales y que contrasta con el comportamiento típico del resto de materiales compuestos convencionales (carbono, vidrio, aramida...).

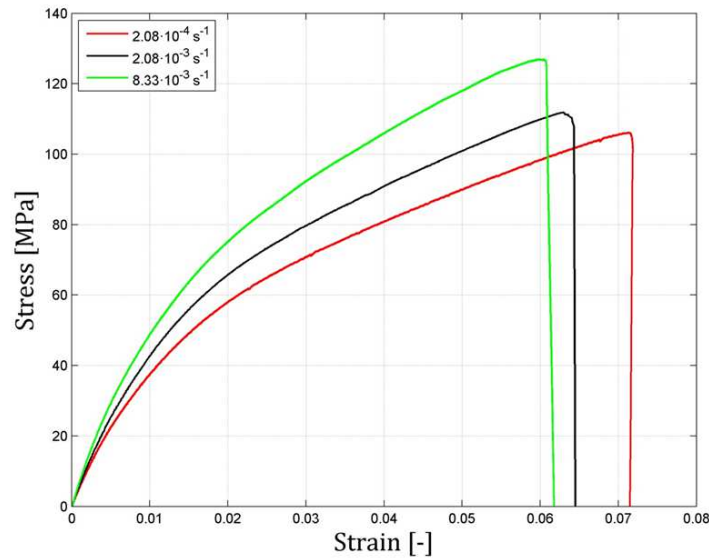


Figura 4.58. Curvas tensión-deformación para el material compuesto de lino, a distintas velocidades de deformación [123].

En éste sentido, ABAQUS permite introducir las curvas de tensión-deformación directamente, pero para ello, primeramente, es necesario determinar y separar la zona elástica de la plástica, así como extrapolar, debido principalmente a que los datos obtenidos en los ensayos son para velocidades de deformación muy bajas, mientras que en los procesos de taladrado las velocidades de deformación son muy altas. Con objeto de poder determinar la zona elástica y la plástica, así como extrapolar los datos obtenidos de los ensayos se hace necesario el empleo de un modelo constitutivo.

4.2.2. Modelo Constitutivo

Las leyes mecánicas de comportamiento del material a ensayar, dependen en gran medida del estado y modo de fabricación del mismo, es decir, los tratamientos que se le han aplicado, el estado tensional derivado de los procesos de fabricación a los que se le ha sometido, etc. Además, fruto de las propias heterogeneidades del material es posible encontrar distintos comportamientos dentro de una misma muestra.

El comportamiento mecánico de los compuestos tradicionales generalmente se asume como elástico lineal hasta fallo. Sin embargo, los compuestos basados en fibras naturales se caracterizan por una elasticidad no lineal, efectos viscosos y deformaciones plásticas antes de la rotura.

Para definir el comportamiento viscoplástico de los materiales compuestos biodegradables, se ha empleado un modelo reológico, el cual, se ha calibrado empleando únicamente ensayos cuasiestáticos. Una vez calibrado el modelo, éste es capaz de predecir curvas de tensión-deformación obtenidas a distintas velocidades de deformación. Los modelos reológicos se basan en el empleo de elementos elásticos, plásticos y viscosos [124] para determinar el comportamiento mecánico de un material y su dependencia temporal bajo diferentes cargas.

El modelo empleado en ésta Tesis se define a través de tres ramas en paralelo, tal como se muestra en la *Figura 4.59*.

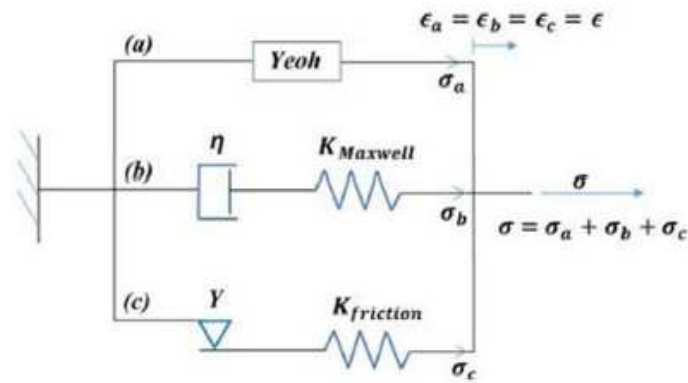


Figura 4.59 Esquema del modelo reológico. La rama (a) describe la elasticidad no lineal, la rama (b) considera los efectos viscosos y la rama (c) incluye la plasticidad [123].

En la primera rama (a), se define el comportamiento elástico no lineal a través de un modelo de Yeoh [125], modelo fenomenológico basado en el comportamiento del caucho, el cual, define el comportamiento elástico no lineal usando la función de densidad de energía de deformación. La segunda rama (b), define el comportamiento viscoso del material a través de un modelo de Maxwell. Por último, en la tercera rama (c), se introduce la plasticidad a través de una analogía friccional al modelo de Maxwell. La *Figura 4.59* representa el esquema de todo el modelo, definido por sólo cinco elementos.

Ecuaciones constitutivas.

El modelo elástico no lineal de Yeoh se basa en materiales incompresibles, por lo que la función de densidad de energía depende de la primera invariante del tensor de deformación Cauchy-Green izquierda en forma cúbica, según la *Ecuación 4.4* muestra:

$$W = \sum_{i=1}^3 C_i (I_1 - 3)^3 \quad (4.4)$$

Donde W es la función de densidad de energía de deformación, C_i representa constantes elásticas e I_1 es la primera invariante. El primer invariante es la traza del tensor de deformación Cauchy-Green izquierdo ($B = FF^T$, siendo F el tensor del gradiente de deformación y B el tensor de deformación Cauchy-Green izquierdo). Considerando la incompresibilidad y la extensión uniaxial, los tramos ($\lambda = \epsilon + 1$) en las tres direcciones principales pueden estar relacionados como $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$ y $\lambda_2 = \lambda_3$ por lo que

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = \lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \quad (4.5)$$

Considerando el tensor de deformación de Cauchy-Green izquierdo expresado como $B = \lambda^2 \cdot n_1 \otimes n_1 + \frac{1}{\lambda} \cdot (n_2 \otimes n_2 + n_3 \otimes n_3)$ y la extensión uniaxial, orientando los tramos principales con los vectores base coordinados, la tensión en la dirección principal resulta:

$$\sigma_{11} = -p + 2 \cdot \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \text{ y } \sigma_{22} = \sigma_{33} = -p + \frac{2}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_1} = 0, \text{ así pues } p = \frac{2}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_1} \text{ y}$$

$$\sigma_{11} = 2 \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{\partial W}{\partial I_1} \quad (4.6)$$

La derivada de la función de densidad de energía de deformación puede obtenerse a partir de la *Ecuación 4.4*:

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = \sum_{i=1}^3 i \cdot C_i (I_1 - 3)^{i-1} \quad (4.7)$$

Introduciendo la *Ecuación 4.5* en la *Ecuación 4.7* y la *Ecuación 4.7* en la *Ecuación 4.6*, la tensión se puede expresar como una función de la deformación para el modelo no-lineal de Yeoh bajo extensión uniaxial, *Ecuación 4.8*:

$$\sigma_{Yeoh} = \frac{2\epsilon(3+\epsilon(3+\epsilon))((1+\epsilon)^2 C_1 + \epsilon^2(3+\epsilon)(2(1+\epsilon)C_2 + 3\epsilon^2(3+\epsilon)C_3))}{(1+\epsilon)^2} \quad (4.8)$$

donde C_1 , C_2 y C_3 son tres constantes elásticas.

La función de la rama (b) es introducir los efectos viscosos, para lo cual, se empleó un modelo de Maxwell, cuyo comportamiento viene descrito por la *Ecuación 4.9*.

$$\sigma_{Maxwell} + \frac{K}{\eta} \cdot \sigma_{Maxwell} = K \cdot \dot{\epsilon} \quad (4.9)$$

El comportamiento del modelo de Maxwell viene dado por un muelle y un amortiguador en serie, por lo que la tensión es la misma en ambos elementos ($\sigma_{amortiguador} = \sigma_{muelle} = \sigma$) y la deformación total es la suma de las deformaciones de muelle y amortiguador ($C_{amortiguador} + C_{muelle} = C$). La ecuación constitutiva del modelo de Maxwell se obtiene incluyendo la definición del muelle $\sigma = K \cdot \epsilon$ (K es la constante del muelle) y la ecuación del amortiguador $\sigma = \eta \frac{\partial W}{\partial I_1}$ (δ es la constante del amortiguador) en la ecuación de la velocidad de deformación, $\dot{\epsilon}_{amortiguador} + \dot{\epsilon}_{muelle} = \dot{\epsilon}$

Finalmente, la rama (c) introduce la plasticidad a través de un muelle y un elemento de fricción en serie. Estos dos elementos producen una analogía de fricción con el modelo Maxwell para definir un comportamiento plástico. La rigidez del modelo está dominada por el elemento de muelle hasta que se activa el elemento de fricción, siendo el rol del elemento de fricción, establecer un límite para la tensión. Por lo tanto, la definición de la relación tensión- deformación para la rama de fricción se da en dos secciones como se muestra en la *Ecuación 4.10*, antes y después de alcanzar la tensión de deformación correspondiente al límite elástico ($y = Y/K_{Fricción}$).

$$\begin{aligned} if < y &\rightarrow \sigma_{Fricción} = K_{fricción} \cdot \epsilon \\ if \geq y &\rightarrow \sigma_{Fricción} = Y \end{aligned} \quad (4.10)$$

Al ser definida la ecuación constitutiva de cada rama, la ecuación constitutiva del modelo global viene dada por la *Ecuación 4.11*.

$$\sigma = \sigma_{Yeoh} + \sigma_{Maxwell} + \sigma_{Fricción} \quad (4.11)$$

Respuesta a la tensión-deformación.

La solución de las ecuaciones constitutivas para el ensayo de tracción se presenta en esta sección. Las tres ramificaciones pueden ser resueltas individualmente imponiendo condiciones iniciales: ($\epsilon(0) = 0$ y $\sigma(0) = 0$), e imponiendo una velocidad de deformación constante. La solución de la ecuación diferencial del modelo de Maxwell es:

$$\sigma_{Maxwell-Tensión} = \dot{\epsilon} \cdot \eta \cdot \left(1 + e^{-\frac{K_{Maxwell}}{\eta} \cdot t}\right) \quad (4.12)$$

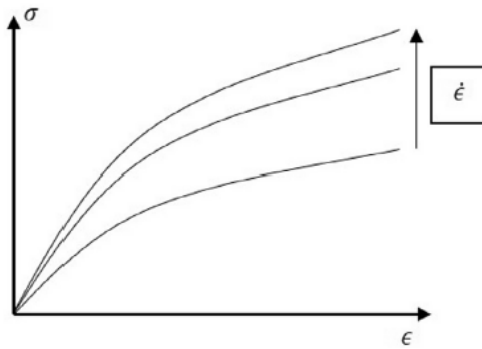


Figura 4.60 Curvas de tensión-deformación obtenidas para diferentes velocidades de deformación [123].

La solución para Yeoh y las ramas de fricción, son independientes de la velocidad de deformación, por lo tanto, la solución se puede encontrar en sustituyendo $\epsilon = \dot{\epsilon} \cdot t$ en la Ecuación 4.8 y 4.10. La solución del modelo global, la Ecuación 4.11, para diferentes velocidades de deformación se muestra en la Figura 4.60.

Respuesta de relajación.

En los ensayos de relajación se impone una tensión inicial y se mantiene con el tiempo ($\dot{\epsilon} = 0$ y $\sigma(0) = \sigma_0$). Se considera que la tensión inicial se aplica instantáneamente, por lo que se puede suponer una velocidad de deformación infinita, Figura 4.61.

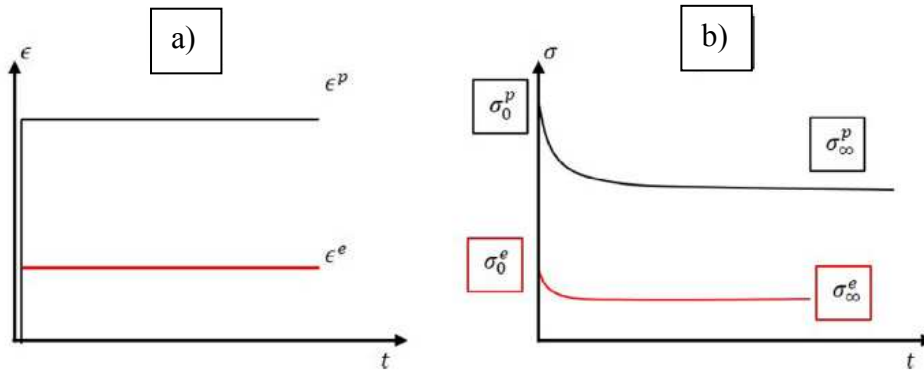


Figura 4.61 Descripción del ensayo de relajación. a) Curvas de deformación vs. tiempo; b) curvas de tensión vs tiempo [123].

Por lo tanto, el amortiguador del modelo de Maxwell se puede considerar inicialmente bloqueado y el primer valor de la tensión es controlado por el muelle $\sigma(0) = K_{Maxwell} \cdot \epsilon_0$. Por otro lado, el amortiguador se relajará durante el ensayo y el valor final de la tensión en el modelo de Maxwell es cero. La solución de la Ecuación 4.9 es:

$$\sigma_{Maxwell-Relajación} = K_{Maxwell} \cdot \dot{\epsilon} \cdot \epsilon_0 e^{-\frac{K_{Maxwell}}{\eta} t} \quad (4.13)$$

Las soluciones del Yeoh y los elementos de fricción son independientes del tiempo. Así, se puede obtener una solución introduciendo $\epsilon = \epsilon_0$ en las Ecuaciones 4.8 y 4.10 respectivamente. La tensión se mantiene constante en estos dos elementos como lo hace la deformación. La respuesta global del modelo en los ensayos de relajación se muestra en la Figura 4.61.b). En la Figura 4.61 se muestran dos ensayos diferentes, viscoelásticos y viscoplásticos, denominadas por superíndices "e" y "p" respectivamente. La deformación impuesta en el ensayo de relajación viscoelástico es menor que la deformación correspondiente al límite elástico, mientras que la deformación impuesta en el ensayo de relajación viscoplástico es mayor.

4.2.3. Calibración del modelo

Se usan siete parámetros para definir el modelo actual: C_1 , C_2 y C_3 son las constantes elásticas de Yeoh, $K_{Maxwell}$ y η son las constantes del muelle y de amortiguador de Maxwell, y $K_{fricción}$ e Y son los parámetros de la rama de fricción. Se realizaron tres ensayos diferentes para calibrar estos parámetros para cada material: ensayos de

relajación viscoelástico y viscoplástico (*Figura 4.61*) y un ensayo de tensión cuasiestático (*Figura 4.60*). Se realizaron dos ensayos de tracción a velocidades de deformación más altas para validar la capacidad del modelo para predecir el comportamiento viscoplástico de los materiales compuestos biodegradables.

Se pueden obtener cuatro valores a partir de ensayos de relajación para calibrar el modelo. La tensión inicial del ensayo viscoelástico (σ_0^e) está definida por la *Ecuación 4.14*, mientras que la tensión final (σ_∞^e) está dada por la *Ecuación 4.15*, siendo ϵ^e la deformación impuesta. Las tensiones inicial y final del ensayo de relajación viscoelástico se muestran en las *Ecuaciones 4.16* y *4.17* respectivamente, siendo ϵ^p la deformación impuesta.

$$\sigma_0^e = \sigma_{Yeoh}(\epsilon^e) + (K_{fricción} + K_{Maxwell}) \cdot \epsilon^e \quad (4.14)$$

$$\sigma_\infty^e = \sigma_{Yeoh}(\epsilon^e) + K_{fricción} \cdot \epsilon^e \quad (4.15)$$

$$\sigma_\infty^p = \sigma_{Yeoh}(\epsilon^p) + Y + K_{Maxwell} \cdot \epsilon^e \quad (4.16)$$

$$\sigma_\infty^p = \sigma_{Yeoh}(\epsilon^p) + Y \quad (4.17)$$

Los valores de $K_{fricción}$, $K_{Maxwell}$ e Y pueden obtenerse como una función de los parámetros de Yeoh usando las *Ecuaciones 4.14-4.16*. Los parámetros de Yeoh, C_1 , C_2 y C_3 , se calcularon a través de un ajuste de mínimos cuadrados sobre los ensayos de tracción cuasiestáticos, con objeto de obtener la curva tensión-deformación. Finalmente, se calibró el parámetro del amortiguador (η) con los ensayos de relajación, considerando las curvaturas de los ensayos viscoelásticos y viscoplásticos, a través de un ajuste de mínimos cuadrados.

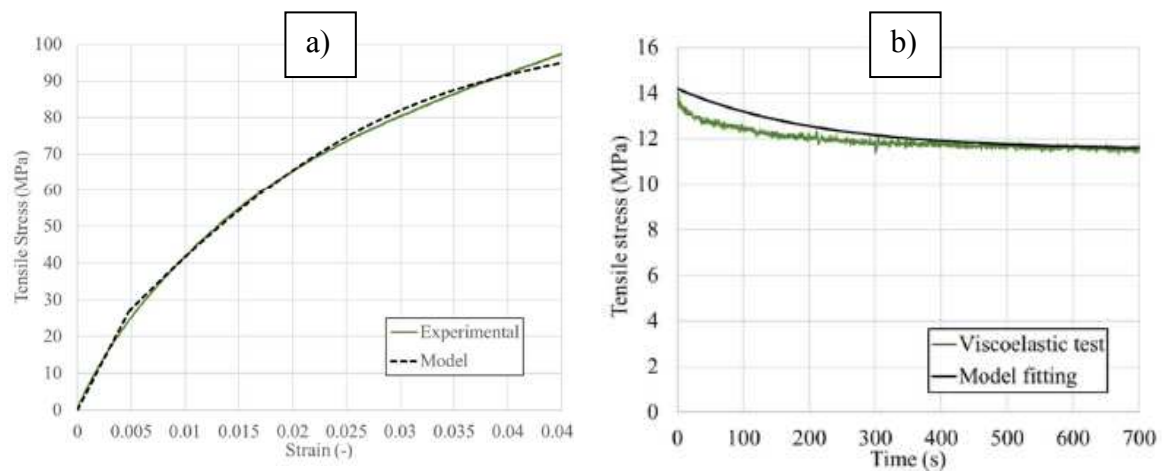
La *Ecuación 4.17* no se utilizó para la calibración del modelo, por esta razón σ_∞^p se empleó para la validación. Adicionalmente, se utilizaron dos curvas de tensión-deformación obtenidas a mayores velocidades de deformación para validar el modelo. Por lo tanto, se obtiene una gran coherencia ya que los parámetros del modelo fueron calibrados con un conjunto de ensayos y se utilizaron diferentes ensayos para su validación.

A fin de calibrar el modelo, se emplearon los resultados de los ensayos de relajación y las curvas de tensión-deformación obtenidas a una velocidad de deformación de $2,08 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.¹ Los principales valores de los parámetros calibrados se resumen en la *Tabla 4.15*.

Tabla 4.15. Parámetros del modelo para el Lino.

BF/PLA 10	
$K_{Maxwell} \text{ (Pa)}$	1.08×10^9
$K_{fricción} \text{ (Pa)}$	2.58×10^9
$\eta \text{ (Pa s)}$	2.30×10^{11}
$Y \text{ (Pa)}$	1.23×10^7
$C_1 (-)$	3.38×10^8
$C_2 (-)$	-1.81×10^{10}
$C_3 (-)$	6.56×10^{11}

En la *Figura 4.62* se muestra una comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo con los parámetros calibrados. En la *Figura 4.62.b)* y *c)*, se representan los ensayos de relajación viscoelástica y viscoplástica respectivamente, donde se calibraron $K_{fricción}$, $K_{Maxwell}$, η e Y . De igual forma, en la *Figura 4.62.a)* se muestran las curvas de tensión-deformación para el material de lino, donde se calibraron los parámetros C_1 , C_2 y C_3 a través de mínimos cuadrados.



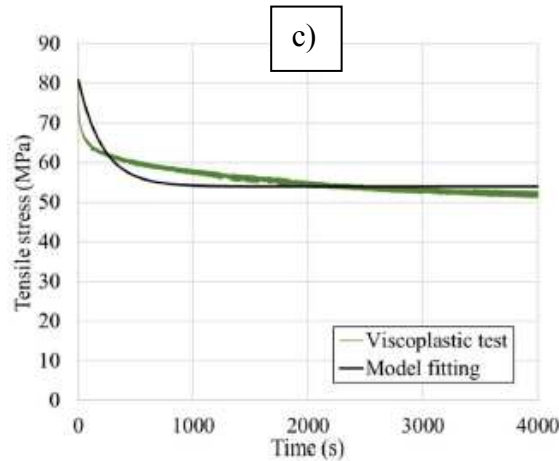


Figura 4.62. Calibración de los parámetros del modelo para el material compuesto a base de Lino. a) Curva tensión-deformación; b) Ensayo de relajación viscoelástica; c) Ensayo de relajación viscoplastica [123].

4.2.1. Validación del modelo

Con objeto de validar el modelo, se empleó el valor de la tensión final (σ_{∞}^p), obtenido en los ensayos de relajación viscoplastica. En la *Tabla 4.16* se incluyen los datos experimentales y las predicciones del modelo para el material compuesto a base de Lino. Se puede observar una excelente concordancia entre la predicción del modelo y el resultado experimental, siendo el error inferior al 3%.

Tabla 4.16. Comparación entre el estrés final experimental y el predicho en el ensayo de relajación viscoplastica (σ_{∞}^p).

BF/PLA 10	
σ_{∞}^p Experimental (MPa)	52.6
σ_{∞}^p Ec. 4.16. Modelo(MPa)	54
Error (%)	2.6

De igual forma, los ensayos de tracción llevados a cabo a velocidades de deformación de $2,08 \times 10^{-4}$ a $8,33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, fueron empleados para validar la precisión del modelo en la predicción de la influencia de la velocidad de deformación sobre las curvas de tensión-deformación. La *Figura 4.63* muestra la comparación entre los datos experimentales y el modelo desarrollado para ambas velocidades de deformación en el caso del material compuesto a base de lino.

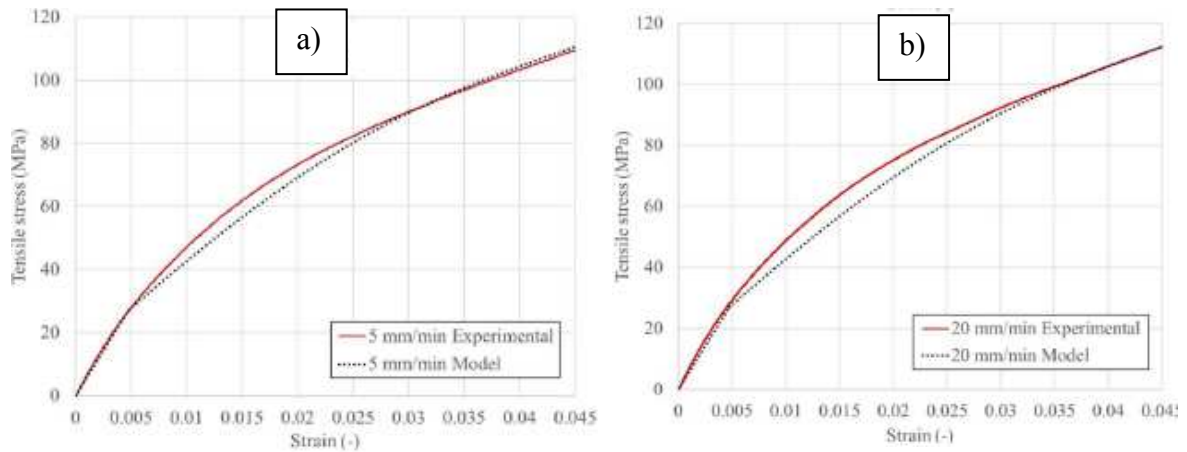


Figura 4.63. Ensayos de tracción llevados a cabo sobre material compuesto a base de Lino, para velocidades de deformación de: a). $2.08 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ y b) $8.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Comparativa entre resultados experimentales y predicciones del modelo.

Se puede observar como la concordancia entre los resultados experimentales y la predicción del modelo es muy alta, por lo que el modelo se puede considerar validado. El modelo es capaz de predecir la influencia de la velocidad de deformación, la cual, deriva en un aumento de la rigidez, igual a como sucede en los resultados experimentales.

4.3.DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

4.3.1. Materiales

Material de la Pieza.

Las curvas de tensión-deformación obtenidas mediante el modelo reológico son introducidas en las propiedades del material dentro del módulo Property (Plastic/Use strain-rate-dependent data) como dato, junto con la densidad, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson (Tabla 4.17) [89], para la caracterización del material compuesto a base de lino.

Tabla 4.17. Propiedades del material compuesto de lino, implementadas en ABAQUS CAE para la modelización del proceso de mecanizado.

BF/PLA 10	
Densidad (Tn/mm3)	1.13×10^9
Módulo de Young (MPa)	5000
Coeficiente de Possion	0.3

Para la eliminación de elementos se ha implementado al modelo una subrutina del tipo VUSDFLD. Dicha subrutina tiene por objeto el establecimiento de un criterio de eliminación de elementos, según el cual, una vez el elemento ha alcanzado un valor crítico de deformación establecido por el usuario (deformación máxima) y definido como función de la velocidad de deformación, éste será eliminado, y, por consiguiente, permitiendo modelar la salida de la viruta durante el proceso.

El proceso llevado a cabo por la subrutina para la eliminación de los elementos queda reflejado en el siguiente diagrama de flujo (*Figura 4.64*):

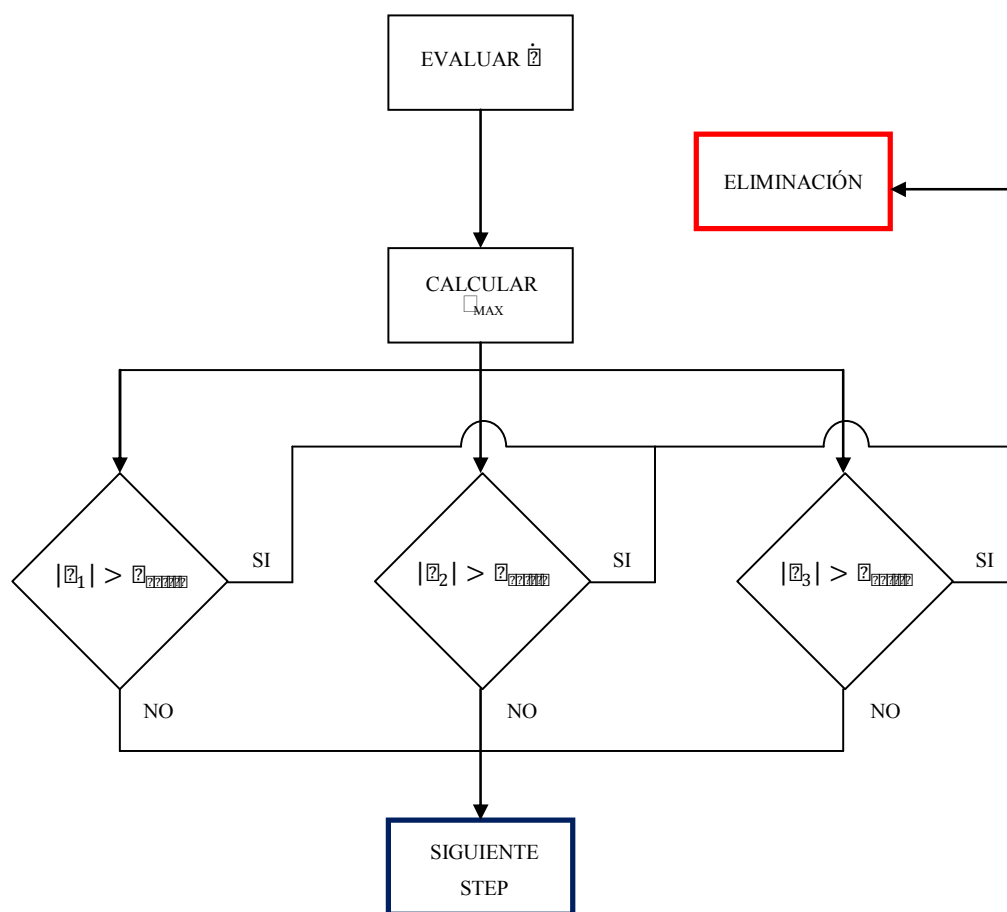


Figura 4.64. Diagrama de flujo que representa el proceso llevado a cabo por la subrutina durante la eliminación de elementos.

En primer lugar, se define la ecuación para la deformación máxima en función la velocidad de deformación. El proceso llevado a cabo por la subrutina comienza con la evaluación de la velocidad de deformación, para posteriormente calcular la deformación máxima. Una vez calculada la deformación máxima, ésta es comparada con la

deformación en las 3 direcciones principales del material, obteniéndose dos posibles respuestas: sí, procediendo entonces a la eliminación de los elementos; y no, pasando al siguiente step.

Material de la Herramienta.

La herramienta se importa al programa ABAQUS CAE como sólido rígido. Ésta circunstancia implica que el comportamiento de la herramienta durante el modelado va a ser la de un sólido no deformable, por lo que no es necesaria la aplicación de propiedades a la misma.

De igual forma, ésta hipótesis puede ser considerada como válida para un sólo taladro (no se evalúa desgaste en la herramienta).

4.3.2. Condiciones de mecanizado modelizadas

Como se apuntó en el apartado 4.1 de este capítulo de la Tesis, la simulación se centrará en el material compuesto biodegradable a base de lino (BF/PLA 10). El objetivo es comprobar la robustez del modelo mediante la variación de distintos parámetros: número de capas que forman el compuesto, velocidad de corte, avance y geometría de la broca. Las condiciones de corte empleadas en las modelizaciones son los siguientes (*Tabla 4.18*):

Tabla 4.18. Casos modelizados y parámetros característicos.

Caso	Capas	V [m/min]	f [mm/rev]	Test Number
Caso 1	2	20	0.03	17
Caso 2			0.06	18
Caso 3			0.12	19
Caso 4				16
Caso 5	3	25	0.06	20
Caso 6		20		26
Caso 7		4		28

Todos los casos planteados se han simulado con las dos geometrías de broca planteadas en el punto 3.2.3.2 de ésta Tesis (*Figura 3.46*), por lo que el número total de simulaciones realizadas llega a 14.

4.3.3. Geometrías

Geometría de la Pieza.

En lo relativo a la geometría de la pieza, primeramente, se planteó una geometría basada en un cuadrado con un mallado grueso en toda la superficie, salvo en la zona de afectación del taladrado donde se realizaría de una manera más fina (*Figura 4.65. a*)).

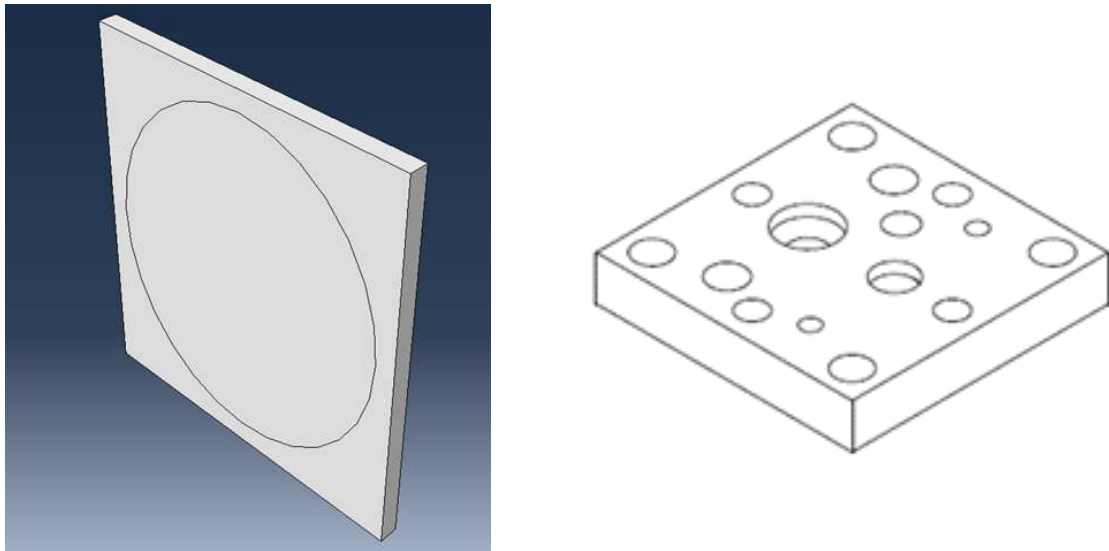


Figura 4.65. a) Primera aproximación a la geometría de la pieza. Geometría descartada; b) placa inferior para la fijación y guiado durante el taladrado de la muestra.

Dicha geometría fue finalmente descartada, ya que, al aplicar la condición de empotramiento en todo el borde perimetral, la zona central tenía un descenso irreal comparado con el permitido por la placa (*Figura 4.65.b*)) alojada en el interior del útil de taladrado (*Figura 3.22.a*)), y por lo tanto arrojando un error sobre los resultados de las medidas de fuerza. Todo ello es debido a que las condiciones de contorno tienen una gran influencia en el modelo.

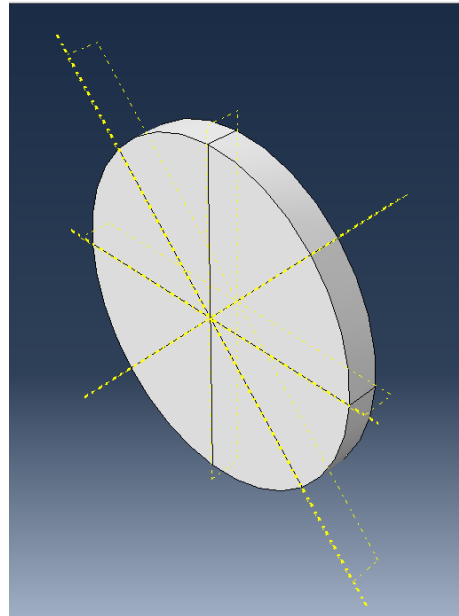


Figura 4.66. Geometría de la placa definitiva. Diámetro 10 mm y espesor 1.4 mm (BF/PLA 10).

La geometría de la placa inferior del útil de fijación (*Figura 4.65.b*), la cual, sujeta y ejerce presión sobre la muestra, permite una superficie libre de generación del daño durante el taladrado de 10 mm (diámetro). Debido a que ésta era la única superficie donde se podría encontrar el daño derivado del proceso de taladrado, la geometría de la muestra derivó a la geometría planteada en la *Figura 4.66*, mucho más realista. El diámetro de la placa planteada es de 10 mm y el espesor correspondiente a dos capas del material compuesto (BF/PLA 10) es de 1.4 mm.

Geometría de las herramientas.

Se han modelizado ambas geometrías de broca, a fin de poder simular todos los casos planteados (*Tabla 4.18*). Primeramente, se dibujaron las geometrías de las brocas en Solid Edge ST9 (*Figura 4.67*) teniendo en cuenta las medidas principales de las mismas (*Tabla 4.19*):

Tabla 4.19. Medidas características para la creación de las distintas geometrías de broca en Solid Edge ST9.

Principales Parámetros	Broca A	Broca B
Longitud (mm)	93	93
Diámetro (mm)	6	6
Ángulo de Punta (°)	118	80

Ángulo de Hélice (°)	35	40
Ángulo de faceta(°)	12	12

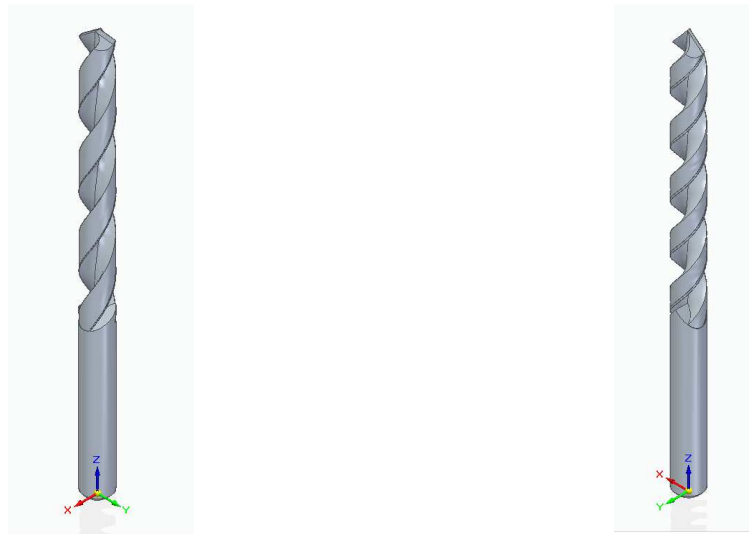


Figura 4.67. Diseño en Solid Edge ST9 de las distintas geometrías de broca para el material compuesto biodegradables. a) Geometría de Broca A; b) Geometría de Broca B.

Debido que, durante la simulación, la parte fundamental es la geometría de la punta, y tener la totalidad de la geometría de la broca carece de interés, las brocas, son importadas a ABAQUS CAE teniendo en cuenta la punta únicamente, en un archivo .catpart (Figura 4.68).

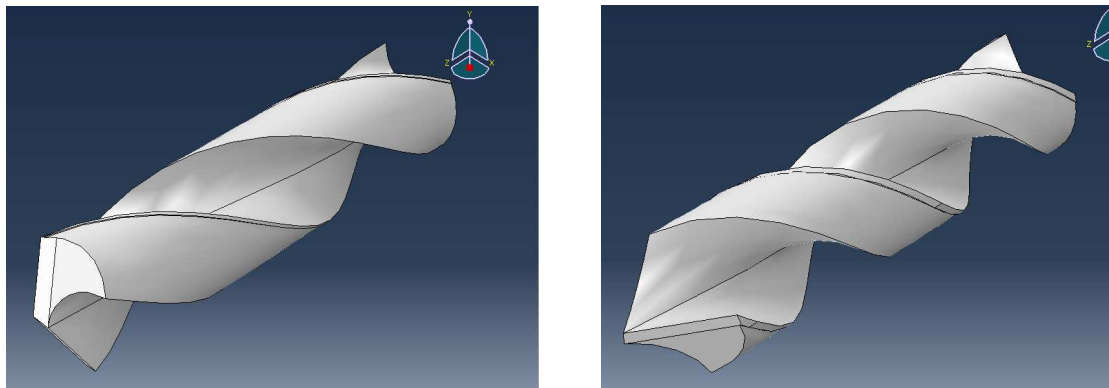


Figura 4.68. Geometrías de broca importadas al programa ABAQUS CAE. a) Geometría de Broca A; b) Geometría de Broca B.

Ambas geometrías de broca se importan al programa ABAQUS CAE como sólido rígido.

4.3.4. Contacto Herramienta-Material

El tipo de interacción entre ambas superficies se definió como “Surface to Surface”, a través de la definición de superficies tipo maestra y esclava ("master" y "slaves"). En la modelización desarrollada, la superficie de la broca es considerada como la maestra, por el contrario, la muestra de material es considerada como esclava, es decir, como una región de nodos, con objeto de que broca y material sigan teniendo contacto tras la primera capa. La formulación del contacto entre los mismos se estableció como “kinematic contact method”.

En el comportamiento tangencial del contacto se estableció la formulación de la fricción con un coeficiente de fricción 0.3, comúnmente empleado en la bibliografía [87]. Respecto al comportamiento normal se dejaron los valores por defecto, lo cual, implica material rígido y no permite la penetración de nodos esclavos en la superficie maestra

4.3.5. Condiciones de contorno

Como todo proceso de mecanizado, se debe obtener un movimiento relativo entre la muestra y la herramienta con el objetivo de generar el arranque de material, correspondiente a la combinación del movimiento de corte y el de avance. En éste caso concreto, la muestra permanece fija dentro del útil de aspiración (*Figura 3.22.a*) y es la broca la que posee ambos movimientos.

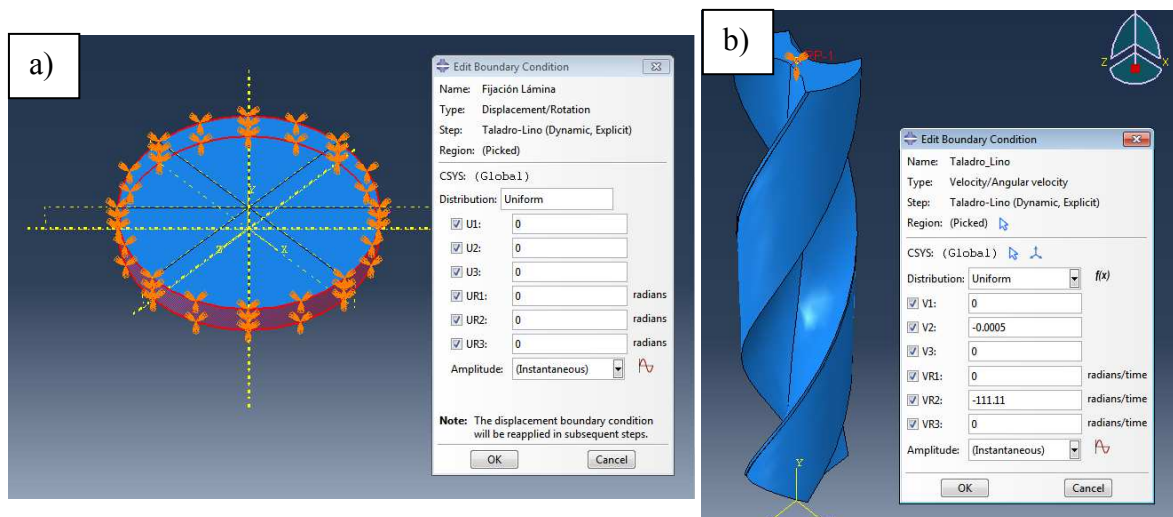


Figura 4.69. Condiciones de contorno fijadas para la placa y la broca en su modelización dentro del programa ABAQUS CAE. a) Placa de Lino; b) Broca A.

Para conseguir dicha combinación, la placa será modelizada imponiéndola una condición de contorno tipo empotramiento, que impida el movimiento de la misma en cualquier dirección (*Figura 4.69.a*).

Al igual que ocurre con la placa, también se deben aplicar condiciones de contorno a la herramienta (*Figura 4.69.b*). El caso concreto de la herramienta, se aplican tres condiciones de contorno diferentes: desplazamiento nulo en el eje X y Z a lo largo del eje de simetría de la broca; Velocidad y par permitido en el eje Y, establecido en el reference point. El valor de dichos movimientos variará en función del caso a estudiar (*Tabla 4.18*).

4.3.6. Mallado de la pieza y la herramienta.

Como ya se ha comentado anteriormente en relación a la geometría de la muestra, primeramente, se realizó un modelo en placa cuadrada (*Figura 4.65.a*), en el que se distinguía dos zonas de mallado, una que carecía de interés, con una malla más gruesa, y otra, correspondiente a la zona de incidencia de la broca, y por lo tanto más fina. Éste modelo fue descartado por no representar fielmente el proceso de taladrado llevado a cabo.

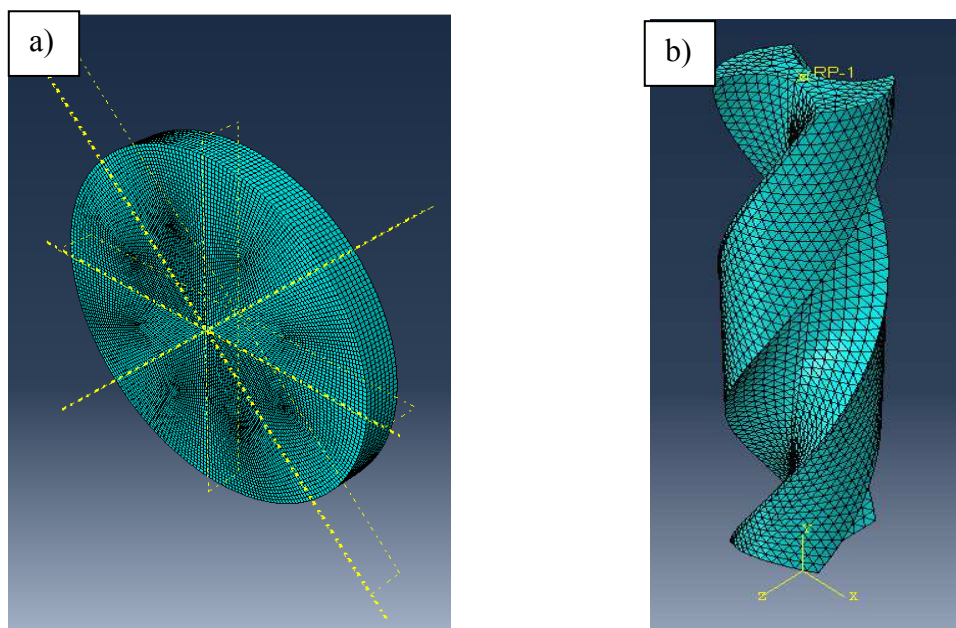


Figura 4.70. Mallado en ABAQUS CAE. a) material compuesto a base de lino (BF/PLA 10); b) Broca A.

Para la placa definitiva (*Figura 4.66*), siendo ésta la correspondiente a toda la zona de afectación del proceso de taladrado, el mallado se ejecutó con el mínimo tamaño de elemento a lo largo de toda la superficie de la misma (*Figura 4.70.a*).

Con respecto al tamaño óptimo del elemento, se realizaron numerosos ensayos con distintas geometrías y densidades de mallado, constatándose que el tipo de malla afecta tanto al tiempo de cálculo como a los resultados.

Tras realizar el análisis de sensibilidad de la malla, se llegó a la conclusión de que el tamaño del elemento óptimo, entendiendo como tal aquel con el que se llega a un compromiso entre la precisión de los resultados y el coste computacional, era de 120 μm (72320 elementos). La simulación del caso más lento (Caso 1 en la *Tabla 4.19*) requiere unas 1680 horas de cálculo empleando un PC “Intel® Xeon® CPU-E5-2630 2.60 GHz (2 procesadores), 64 GB de RAM”. Por el contrario, el más rápido se completó en apenas 6 horas (Caso 3 en la *Tabla 4.19*).

Con respecto a la herramienta, y como se comentó previamente en la geometría de la herramienta, esta se importa al programa ABAQUS CAE como sólido rígido. Este hecho hace que el comportamiento de la herramienta durante el modelado vaya a ser la de un sólido no deformable, por lo que el tamaño de malla de la misma, carece a priori de interés, simplificando el modelo y por ende el coste computacional.

En este sentido, la broca (*Figura 4.70.b*) ha sido mallada con un tamaño de elemento de 500 μm , y un número total de elementos de 5946 para la broca A y de 6220 para la Broca B (R3D3; Tri; Explicit).

4.4.VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

Para la validación del modelo numérico se tuvieron en cuenta las fuerzas de corte obtenidas durante los ensayos de mecanizado (*Figura 3.49 y 3.51*).

Para ello, los modelos numéricos se ajustaron a las condiciones planteadas en los ensayos experimentales, descritos en el punto 3.2.3.4 del capítulo anterior. Los casos planteados

se recogen en la *Tabla 4.18*, centrándose en el lino (BF/PLA 10) para ambas geometrías de broca.

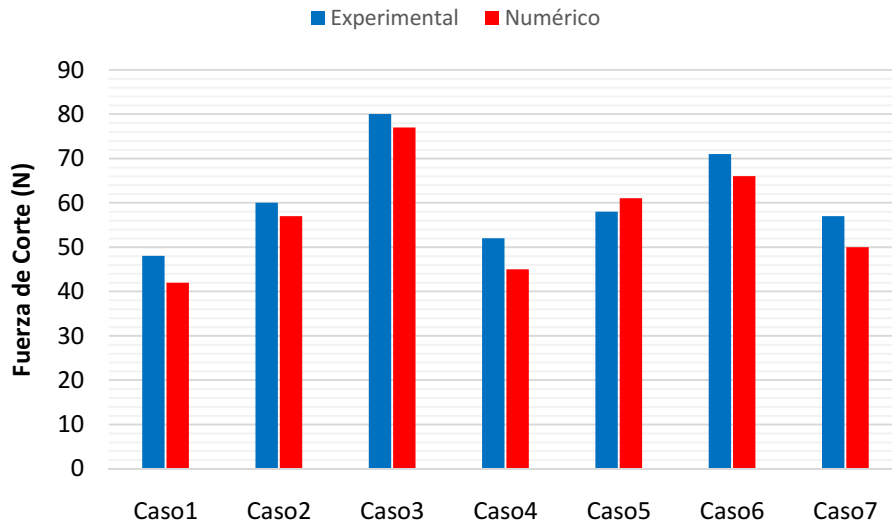


Figura 4.71. Comparación del modelo numérico con el experimental para la Broca A durante el taladrado de material compuesto a base de lino (BF/PLA 10).

En la *Figura 4.71* se puede observar la comparativa entre los resultados obtenidos para el modelo numérico y los obtenidos en los ensayos de mecanizado, para los casos planteados con la Broca A.

Como se puede observar, para la broca A, la predicción del modelo es muy buena para los casos planteados a una velocidad de corte y avance mayor (Caso 3 y 5) en los que el error máximo es del 5%, prediciendo dichos valores de forma aceptable. Por el contrario, cuando la velocidad de corte y avance son pequeñas, el error alcanzado aumenta significativamente (Caso 4 y 1) hasta llegar a valores del 13%.

Tabla 4.20. Comparativa de resultados de Fuerza de corte obtenidas experimental y analíticamente en las distintas condiciones analizadas para la Broca A

Casos	Capas	V [m/min]	f [mm/rev]	F. Corte [N]. Experimental	F. Corte [N]. Numérico	Error [%]
Caso 1	2	20	0.03	48	42	13
Caso 2			0.06	60	57	5
Caso 3		15	0.12	80	77	4
Caso 4			0.06	52	45	13
Caso 5				58	61	5

Caso 6	3		71	66	7
Caso 7	4	20	57	50	12

En la *Figura 4.72*, se representa la comparativa de los valores obtenidos con el modelo numérico en relación con los obtenidos con los ensayos experimentales para la broca B.

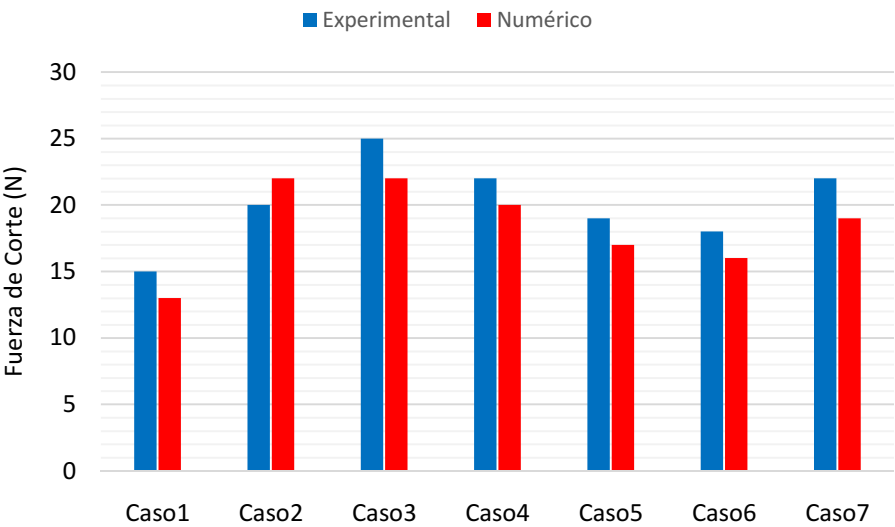


Figura 4.72. Comparación del modelo numérico con el experimental para la Broca B durante el taladrado de material compuesto a base de lino (BF/PLA 10).

Atiendo a los valores representados para la Broca B, se puede apreciar como el error máximo para todos los casos, se presenta para el Caso 7, alcanzando un 13% de error. Por otro lado, la mejor correlación entre los ensayos experimentales y el modelo numérico se obtiene para el Caso 2, donde el error es de un 9%.

Los datos obtenidos para la Broca B en los distintos casos analizados experimental y numéricamente se recogen en la *Tabla 4.21*.

Los valores representados pueden considerarse aceptables y por lo tanto considerar el modelo validado teniendo en cuenta los obtenidos experimentalmente, presentando un alto grado de exactitud.

Tabla 4.21. Comparativa de resultados de Fuerza de corte obtenidas experimental y analíticamente en las distintas condiciones analizadas para la Broca B.

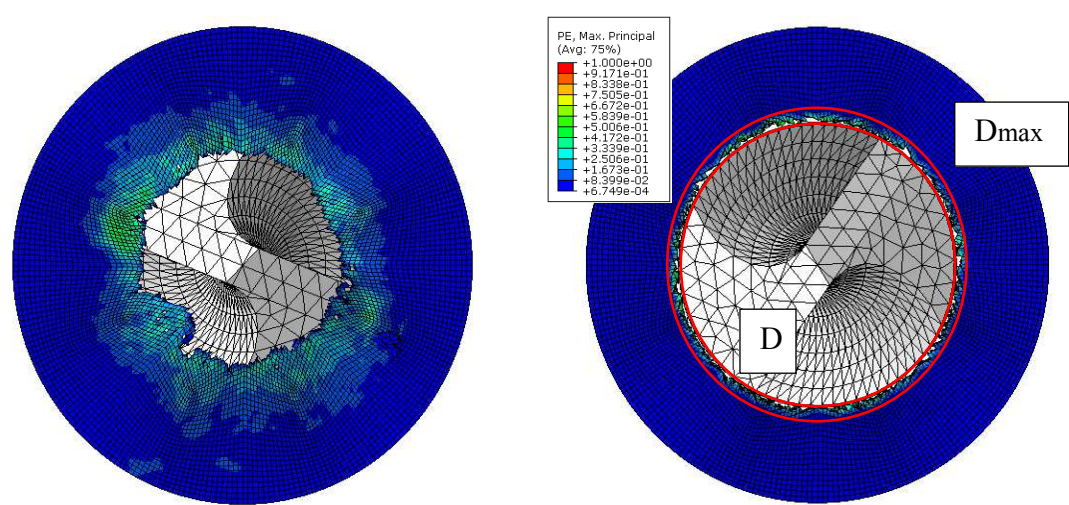
Casos	Capas	V [m/min]	f [mm/rev]	F. Corte [N]. Experimental	F. Corte [N]. Numérico	Error [%]	
Caso 1	2	20	0.03	15	13	13	
Caso 2			0.06	20	22	10	
Caso 3		0.12	25	22	12		
Caso 4		15	22	20	9		
Caso 5	3	25	0.06	19	17	11	
Caso 6		20		18	16	11	
Caso 7		4		22	19	13	

Cabe destacar que el modelo permite analizar distintas geometrías de broca, velocidades de corte y avances.

4.5.ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS.

4.5.1. Cuantificación del daño

Con objeto de cuantificar el daño en la muestra, se opera igual a como se hizo en la parte experimental (Figura 3.47). En el caso concreto del modelo, se emplea el resultado final de la modelización, cuantificando el área afectada mediante el propio programa de ABAQUS CAE (Figura 4.73).



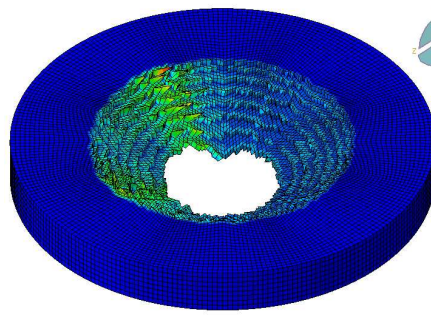


Figura 4.73. Cuantificación del F_d en la modelización del material compuesto a base de lino en ABAQUS CAE. Representado en Caso 3 con la geometría de broca A.

El daño es cuantificado en términos de deformación plástica generada en la muestra durante el proceso de taladrado modelizado, para ambas geometrías de broca, el cual, se compara con el obtenido experimentalmente. En la *Figura 4.74* se representa el daño obtenido para la geometría de broca A en comparación con los ensayos experimentales.

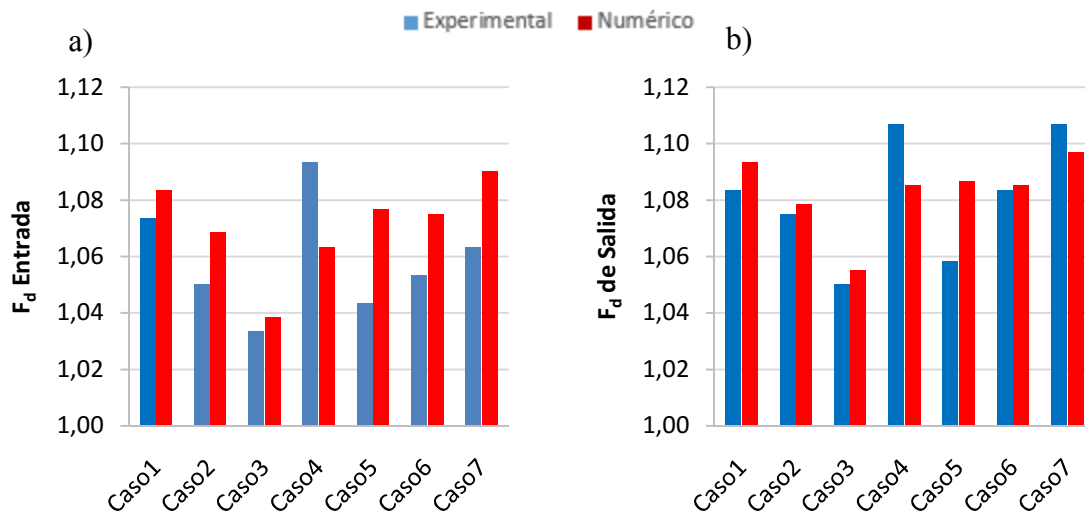


Figura 4.74. Comparativa entre el Factor de daño obtenido para todos los casos planteados (Tabla 4.18) experimental y numéricamente con la Broca A. a) a la entrada; b) a la salida.

Se puede observar como el modelo cuantifica de forma correcta el valor del factor de daño, obteniéndose un mayor valor del mismo a la salida que a la entrada en todos los casos estudiados, siguiendo la tendencia de los resultados obtenidos experimentalmente. Para el caso concreto de la entrada, se obtuvo un error máximo para el Caso 5 del 3.2%. Por el contrario, el mejor resultado se obtuvo para el Caso 3, en el que el error alcanzado ronda el 0.5%. En lo relativo al factor de daño a la salida, el error obtenido sigue la misma tendencia, presentándose el mayor valor para el Caso 1 con un 2.7%. Por contra,

el mejor valor se presenta para el Caso 6, en el que el error acumulado se encuentra alrededor de 0.2%.

Lo más importante es que el modelo es capaz de reproducir las mismas tendencias observadas experimentalmente. Observando los Casos 1,2 y 3, siendo estos los casos en los que la velocidad de corte permanece constante (20 m/min) y varía el avance (0.03, 0.06 y 0.12 mm/rev respectivamente), se puede constatar como el modelo numérico también corrobora la tendencia planteada en los ensayos experimentales, según la cual, en el taladrado de materiales compuestos a base de fibras naturales, incrementos en el avance suponen un decrecimiento del daño generado (*Figura 4.75*). Todos los modelos de la literatura predicen lo contrario porque consideran comportamiento elástico lineal independiente de la velocidad de deformación. Por lo tanto, el modelo desarrollado en el presente documento, demuestra que el motivo por el que el daño disminuye con incrementos en el avance es el comportamiento viscoelastoplástico de los materiales compuestos de fibras naturales.

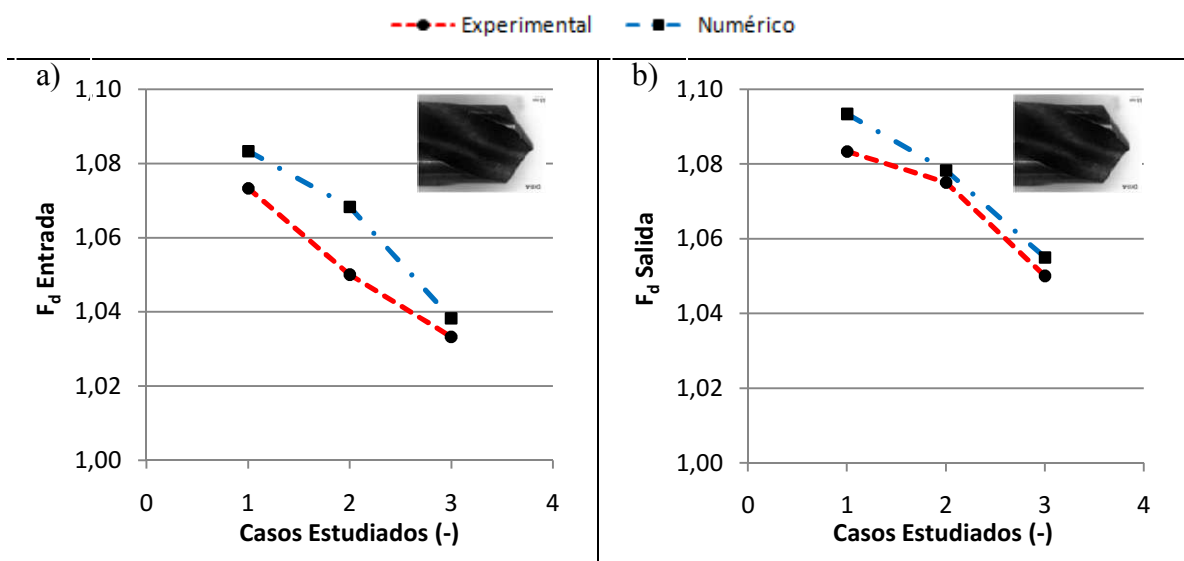


Figura 4.75. Análisis de la tendencia del F_d tanto a la entrada como a la salida con respecto al avance para la Broca A. Resultados experimentales y analíticos.

Los valores obtenidos para la broca B, se recogen en la *Figura 4.76*. Como se puede observar, los valores obtenidos en la simulación corroboran la tendencia obtenida mediante los ensayos experimentales, según la cual, el factor de daño a la salida es mayor que el de entrada. Atendiendo al daño en la entrada, podemos observar como la correlación entre experimental y numérico es buena, obteniéndose un error máximo para

el Caso 1 del 2.7%. Por el contrario, el mejor resultado es el obtenido para el Caso 3, donde el error ha alcanzado un valor del 0.7%. En relación con el daño a la salida, se obtiene un error máximo en el Caso 1 de un 3%. En cuanto el error mínimo alcanzado, corresponde con el Caso 3, y representa el 1.4%.

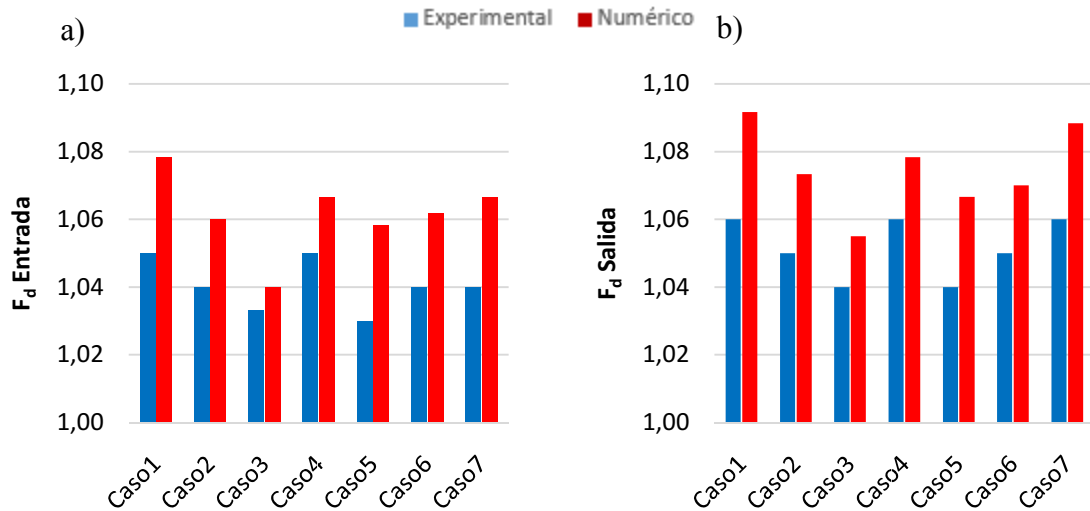


Figura 4.76. Comparativa entre el Factor de daño obtenido para todos los casos planteados (Tabla 4.18) experimental y numéricamente con la Broca B. a) a la entrada; b) a la salida.

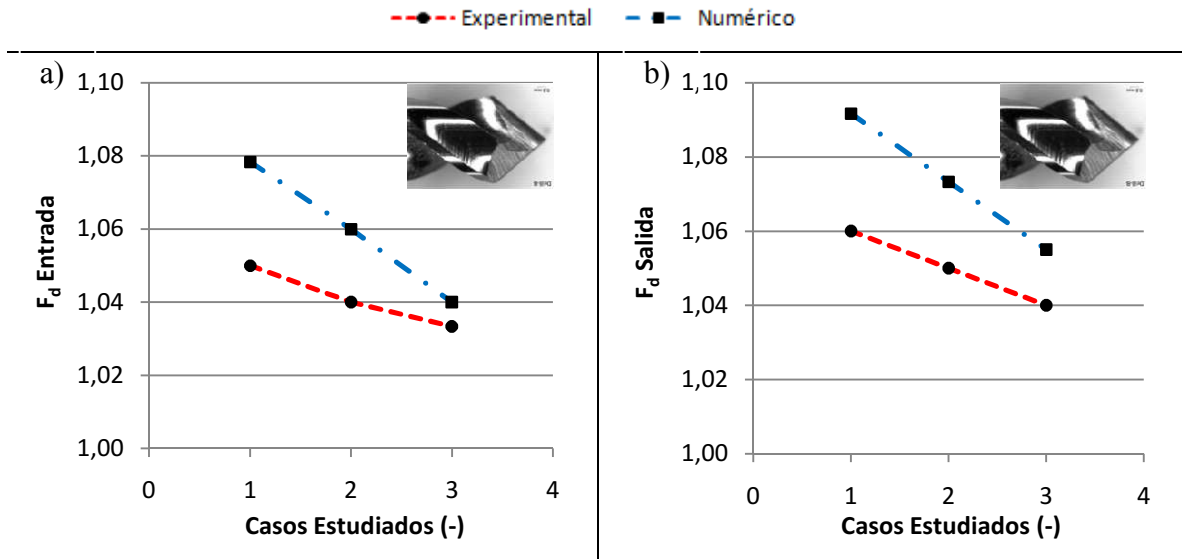


Figura 4.77. Análisis de la tendencia del F_d tanto a la entrada como a la salida con respecto al avance para la Broca B. Resultados experimentales y analíticos.

En el caso de la Broca B, se puede observar como la tendencia descrita relativa a la disminución del daño generado durante el taladrado con respecto al aumento del avance, se cumple igualmente, viéndose representada en la *Figura 4.77*.

4.6.CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

A continuación, se reúnen y detallan algunas de las conclusiones principales obtenidas durante la modelización del taladrado sobre el material compuesto a base de lino (BF/PLA10):

- Se ha desarrollado un modelo numérico 3D del proceso de taladrado sobre material compuesto a base de lino. El modelo posibilita el estudio de dos geometrías de broca distintas, así como distintas velocidades de corte y avances.
- Se ha empleado un modelo constitutivo que permita determinar el comportamiento viscoelastoplástico del material compuesto de fibras naturales, posibilitando su implementación en la modelización.
- Tras la validación del modelo numérico con los datos obtenidos por los ensayos experimentales, dicho modelo puede considerarse adecuado para la simulación del proceso de taladrado de materiales compuestos biodegradables, así como para la cuantificación del daño derivado del mismo. Las diferencias entre los valores obtenidos por el modelo y los ensayos experimentales relativos a las fuerzas de corte se encuentran entre el 5 y el 13%.
- El modelo desarrollado permite la cuantificación del factor de daño derivado del proceso de mecanizado de forma óptima, obteniéndose unos valores que se encuentran entre el 0.2 y el 3.2% en todos los casos objeto de estudio.
- Este modelo permite encontrar una explicación física al fenómeno observado experimentalmente, según el cual, incrementos en el avance suponen una disminución del daño derivado del proceso de taladrado, tendencia contraria a la presente en el procesado de materiales compuestos tradicionales.

- A través del modelo numérico, es posible corroborar la tendencia obtenida en los ensayos experimentales del taladrado sobre material compuesto a base de lino. Según ésta tendencia, el daño inducido disminuye al aumentar el avance, lo cual, es contrario a la tendencia habitual presente en el taladrado de materiales compuestos convencionales.

CAPÍTULO 5: Conclusiones y trabajos futuros

5.1.CONCLUSIONES Y APORTACIONES ORIGINALES.

El presente trabajo de tesis doctoral se ha centrado en el estudio del taladrado sobre materiales compuestos a base de fibra de carbono, fibra de aramida y fibras naturales. El trabajo ha abarcado desde ensayos de taladrado sobre los materiales compuestos descritos anteriormente hasta el desarrollo de un modelo numérico sobre el material compuesto biodegradable a base de lino.

5.1.1. Conclusiones y aportaciones relativas al trabajo experimental.

Mediante el trabajo experimental se han analizado los principales parámetros de corte relativos a los procesos de taladrado de los materiales compuestos objeto de estudio. Todos los ensayos planteados se han llevado a cabo en seco, cuantificando las fuerzas de corte y el daño derivado del proceso de mecanizado al que se han sometido los distintos

materiales. Dichos ensayos tenían por objeto establecer los parámetros óptimos para el taladrado de los materiales compuestos planteados. Se ensayaron distintas geometrías de broca, atendiendo a referencias comerciales y bibliográficas. Las principales conclusiones derivadas de los ensayos experimentales son las siguientes:

Fibra de Carbono:

- Se puede observar como la broca Reamer, dentro de las estudiadas, es la geometría más adecuada para taladrar en material en tejido, con un avance pequeño y una velocidad de corte elevada.
- La broca Reamer también puede ser óptima para el material en cinta, trabajando con un avance bajo y una velocidad de corte alta, la cual, supone un parámetro importante debido a que su influencia sobre la delaminación es alta.
- La broca Brad presenta los valores de fuerzas de corte más altos y en consecuencia la peor calidad superficial.
- En relación a la influencia de la configuración de las fibras en el material compuesto, se puede concluir que el material en cinta es más susceptible de sufrir daño por delaminación que el material en tejido, experimentando una delaminación alta mientras las fuerzas de corte son bajas.

Fibra de Aramida:

- Se puede observar como la broca Brad es la geometría más adecuada para taladrar en material compuesto de aramida, con un avance pequeño y una velocidad de corte elevada. Además, las fuerzas de corte y par obtenidas son las menores en comparación con la geometría helicoidal.
- La broca helicoidal presenta los valores de fuerzas de corte más altos y en consecuencia la peor calidad superficial.

- En general y para ambas geometrías de broca, el daño en el material es mayor en la salida que en la entrada, obteniéndose los peores valores a velocidades de corte elevadas.

Fibras Naturales:

- Se ha encontrado que la extensión del daño decrece cuando el avance aumenta, manteniendo la velocidad de corte constante.
- La influencia de la velocidad de corte sobre las fuerzas de corte se ha encontrado despreciable, aunque la velocidad de corte influyó en el daño inducido. Éste hecho está relacionado con la naturaleza del daño, mayoritariamente Fraying.
- Las fuerzas, como era de esperar, aumentan con el avance. Para todos los casos, las fuerzas de corte inducidas por la broca A son mayores que aquellas obtenidas con la broca B. Ésta circunstancia, está relacionada con el mayor ángulo de punta de la broca A, lo cual estriba en menores valores de la fuerza de corte independientemente del avance.
- Mientras que el espesor de la muestra presenta influencia sobre la extensión del daño, la influencia del diámetro de la broca se puede considerar despreciable.
- La extensión del daño depende del tipo de fibra. El daño inducido durante el taladrado se ha encontrado menor para el compuesto basado en fibras de algodón y yute debido a su menor resistencia a la tracción. La matriz basada en el polímero 10361D, recomendada para fibras naturales debido a la mejor cohesión de la interfaz, presenta una reducción en el Fraying cuando se compara con el polímero 3260HP.

Tabla resumen:

A continuación, se recogen en la *Tabla 5.22* las geometrías de broca, parámetros de corte, así como el daño mínimo y fuerzas de corte derivadas de los parámetros seleccionados para cada material objeto de éste estudio:

Tabla 5.22. Resumen de parámetros resultados óptimos para cada material procesado en la presente Tesis.

Fibras/Mat. Compuesto	Broca	V [m/min]	f [mm/rev]	F_d Mínimo (entrada) [-]	F_d Mínimo (salida) [-]	F. Corte [N]
Carbono (Tejido)	Reamer	100	0.05	1.06	1.01	49.41
Carbono (Cinta)				1.05	1.19	70
Aramida	Brad	110	0.025	1.16	1.24	60
Naturales (BC/PLA 10)	Helicoidal (118°)	20	0.12	1.02	1.03	65

5.1.2. Conclusiones y aportaciones relativas al modelo numérico.

- Se ha desarrollado un modelo numérico 3D del proceso de taladrado sobre material compuesto a base de lino. El modelo posibilita el estudio de dos geometrías de broca distintas, así como distintas velocidades de corte y avances.
- Se ha empleado un modelo constitutivo que permita determinar el comportamiento viscoelastoplástico del material compuesto de fibras naturales, posibilitando su implementación en la modelización.
- Tras la validación del modelo numérico con los datos obtenidos por los ensayos experimentales, dicho modelo puede considerarse adecuado para la simulación del proceso de taladrado de materiales compuestos biodegradables, así como para la cuantificación del daño derivado del mismo. Las diferencias entre los valores obtenidos por el modelo y los ensayos experimentales relativos a las fuerzas de corte se encuentran entre el 5 y el 13%.

- El modelo desarrollado permite la cuantificación del factor de daño derivado del proceso de mecanizado de forma óptima, obteniéndose unos valores que se encuentran entre el 0.2 y el 3.2% en todos los casos objeto de estudio.
- Este modelo permite encontrar una explicación física al fenómeno observado experimentalmente, según el cual, incrementos en el avance suponen una disminución del daño derivado del proceso de taladrado, tendencia contraria a la presente en el procesado de materiales compuestos tradicionales.
- A través del modelo numérico, es posible corroborar la tendencia obtenida en los ensayos experimentales del taladrado sobre material compuesto a base de lino. Según ésta tendencia, el daño inducido disminuye al aumentar el avance, lo cual, es contrario a la tendencia habitual presente en el taladrado de materiales compuestos convencionales.

5.2.LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS.

En lo relativo a los ensayos experimentales sería deseable completar los estudios:

- Estudiar nuevas geometrías de broca en el taladrado de materiales compuestos a base de aramida y fibras naturales.
- Analizar el posible desgaste de la herramienta durante el taladrado, así como la influencia en el daño, en el procesado de los materiales compuestos biodegradables y a base de fibras de aramida.
- Plantear la viabilidad de la realización de un posible estudio de la temperatura durante el taladrado de los materiales compuestos objeto de estudio en el presente trabajo.
- Estudiar la influencia de la variación del espesor en las muestras de material compuesto a base de fibras de aramida durante el taladrado.

En lo concerniente al modelo 3D desarrollado para la simulación de los procesos de taladrado, es necesario su mejora y la implementación de nuevos criterios o vías:

- Reducir el tamaño de los elementos en la placa para conseguir una mejor correlación del daño obtenido.
- Posibilitar la introducción de geometrías desgastadas en el modelo y ser capaz de modelizar el resultado, validándolo experimentalmente.
- Implementar el resto de fibras naturales en el modelo, y ser capaz de modelizar los principales parámetros de corte, validando los resultados de fuerzas de corte y factor de daño con los obtenidos experimentalmente.
- Desarrollar un modelo numérico en 3D mediante la herramienta ABAQUS CAE para la modelización del proceso de taladrado de materiales compuestos a base de fibras de aramida.

5.3.PUBLICACIONES EN CONGRESOS Y REVISTAS

5.3.1. Publicación en revistas JRC.

Antonio Díaz-Álvarez; Ángel Rubio-López, Carlos Santiuste; María Henar Miguélez. Experimental analysis of drilling induced damage in biocomposites. Textile Research Journal 2017; 1-15.

A. Díaz-Álvarez, M. Rodríguez-Millán, J. Díaz Álvarez, M.H. Miguélez. Experimental analysis of drilling induced damage in Kevlar composites. Compos Struct (En revision).

A. Díaz-Álvarez, C. Santiuste, M.H. Miguélez. Numerical analysis in drilling biocomposites. (En revisión).

N. Feito, J. Díaz-Álvarez, A. Díaz-Álvarez, J.L. Cantero, H. Miguélez. Experimental Analysis of the Influence of Drill Point Angle and Wear on the Drilling of Woven CFRPs. *Materials* 2014, 7, 4258-4271.

Rubio-López A, Olmedo A, Díaz-Álvarez A, Santiuste C. Manufacture of compression moulded PLA based biocomposites: A parametric study. *Compos Struct* 2015;131:995-1000.

Feito N, Díaz-Alvarez A, Cantero JL, Rodriguez-Millan M, Miguelez, H. Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs. *J Reinf Plast Compos* 2016;35(1):33-55.

5.3.2. Publicación en congresos.

A. Díaz-Alvarez, C. Santiuste, M. Rodriguez-Millan, J. Díaz-Álvarez, H. Miguélez, Influence of drilling parameters in aramid composites. 3rd International Conference on Mechanics of Composites MECHCOMP3 2017.

N. Feito, J. Díaz-Álvarez, A. Díaz-Álvarez, J. L. Cantero, J. López-Puente, H. Miguélez, Influence of tool geometry in drilling cfrp. 16th European Conference on Composite Materials ECCM16 2014.

A. Rubio-López, A. Olmedo, A. Díaz-Álvarez, C. Santiuste. Fabricación de materiales compuestos biodegradables con matriz de ácido poliláctico. 3º Encontro Português de Materiais e Estruturas Compôsitais ENMEC2014.

A. Rubio-López, A. Olmedo, A. Díaz-Álvarez, C. Santiuste. Study of induced damage during drilling on natural fibre based biocomposites. International Conference on Advances in Composite Materials and Structures.

A. Rubio-López, A. Olmedo, A. Díaz-Álvarez, C. Santiuste. Parametric study on the manufacturing of biodegradable composites. 2nd International Conference on Natural Fibers.

A. Rubio-López, A. Díaz-Álvarez, A. Olmedo, C. Santiuste. Analysis of the manufacturing parameters on the mechanical properties of natural fibres composites. 18th International Conference on Composite Structures.

A. Rubio-López, A. Díaz-Álvarez, A. Olmedo, C. Santiuste. Numerical study of the behavior of natural fibres composites under low-velocity impact. 18th International Conference on Composite Structures.

A. Rubio-López, T. Hoang-Hoang, A. Díaz-Álvarez, C. Santiuste. Modeling of viscoelastoplastic behavior of Flax/PLA biodegradable composites. International 2nd International Conference on Mechanics of Composites.

A. Rubio-López, J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, A. Díaz-Álvarez, C. Santiuste. Impact and Compression after Impact (CAI) behaviour of PLA/Flax biocomposites. International 2nd International Conference on Mechanics of Composites.

A. Rubio-López, T. Hoang-Hoang, A. Díaz-Álvarez, E. Escobar, C. Santiuste, Simulation of the impact behavior of PLA/Flax biocomposites. International Conference on Composite Structures ICCS19.

CAPÍTULO 6: Bibliografía

[1]. G. Poulachona, J. Outeiroa, C. Ramirez, V. Andréa, G. Abrivardb. Hole surface topography and tool wear in CFRP drilling. Procedia CIRP 45 (2016) 35 – 38.

[2]. N. Feito, J. Díaz-Álvarez, A. Díaz-Álvarez, JL. Cantero, H. Miguélez. Experimental Analysis of the Influence of Drill Point Angle and Wear on the Drilling of Woven CFRPs. Materials 2014, 7, 4258-4271.

[3]. A. Díaz-Álvarez, A. Rubio-López, C. Santiuste, H. Miguélez. Experimental analysis of drilling induced damage in biocomposites. Textile Research Journal 2017; 1-15.

[4]. L. de Lacalle, L. Norbeto. Mecanizado de alto rendimiento. Ediciones Técnicas Izaro (2004).

[5]. Distintas brocas en el mercado [en línea]. (Última visita: Marzo 2017) Disponible en Web:

<http://www.guhring.es>.

- [6]. Tecnología Mecánica. Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco
- [7]. K. Nakayama, M. Arai. Burr formation in metal cutting. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 36, pp. 33–36, 1987.
- [8]. J. Liang, S. S. Bi. Experimental Studies for Burrs in Dry Drilling of Stacked Metal Materials. Advanced Materials Research, vol. 129-131, pp. 959–963, 2010.
- [9]. Koronis G, Silva A, Fontul M. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. Compos Part B: Eng 2013;44(1):120–127.
- [10]. Kim KM, Son JH, Kim SH, Weller CL, Hanna M. Properties of Chitosan Films as a Function of pH and Solvent Type. Biological Systems Engineering: Papers and Publications 2006; Paper 111.
- [11]. Wilkes CE, Summers JW, Daniels CA, Berard MT. PVC Handbook. Hanser Verlag 2005.
- [12]. Melo JDD, Carvalho LFM, Medeiros AM, Souto CRO, Paskocimas CA. A biodegradable composite material based on polyhydroxybutyrate (PHB) and carnauba fibers. Composites Part B: Eng 2012;43:2827–2835.
- [13]. Akil HM, Omar MF, Mazuki AAM, Safiee S, Ishak ZAM, Abu Bakar A. Kenaf fiber reinforced composites: A review. Mater Des 2011;32(8-9):4107–4121.
- [14]. Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. Progress in Polymer Science 2012;37(11):1552–1596.
- [15]. Graupner N, Herrmann AS, Müssig J. Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application áreas. Composites Part A 2009;40:810–821.

- [16]. Huber T, Müssig J, Curnow O, Pang S, Bickerton S, Staiger MP. A critical review of all-cellulose composites. *J Mater Sci* 2012;47(3):1171–1186.
- [17]. Precio del acero [en línea]. IndexMundi (Última visita: Marzo 2017) Disponible en Web:
<http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=acero-laminado-en-caliente>
- [18]. Francis S. Materiales y Materias primas. Capítulo 10, Materiales Compuestos. Colección Encuentro Inet.
- [19]. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III Madrid. Estructuras de Materiales Compuestos. Apuntes asignatura Estructuras de Materiales Compuestos, Máster en Mecánica Industrial, UC3M. Curso 2016-2017.
- [20]. Akil HM, Omar MF, Mazuki AAM, Safiee S, Ishak ZAM, Abu Bakar A. Kenaf fiber reinforced composites: A review. *Mater Des* 2011;32(8-9):4107–4121.
- [21]. Tawakkal ISMA, Talib RA, Abdan K, Ling CN. Mechanical and physical properties of Kenaf-derived Cellulose (KDC)-filled polylactic acid (PLA) composites. *BioResources* 2012;7(2):1643-4655.
- [22]. Serizawa S, Inoue K, Iji M. Kenaf fiber reinforced poly (lactic acid) used for electronic products. *J Appl Polym Sci* 2006;100(1):618-24.
- [23]. Cortés JG, Barroso LR, Pecos JMQ. Kenaf fibre in Southwestern Spain. 15th International Conference for Renewable Resources and Plant Biotechnology 2009.
- [24]. Bledzki AK, Reihmane S, Gassan J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. *J Appl Pol Sci* 1996;5:1329–36.

- [25]. Mishra R, Malik J, Singh I, Davim JP. Neural network approach for estimate the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates. *Mater Des* 2010;31:2790–5.
- [26]. Gaitonde VN, Karnik SR, Campos Rubio J, Esteves Correia A, Abrao AM, Paulo Davim J. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *J Mater Process Technol* 2008;203:431–8.
- [27]. Jain S, Yang DCH. Delamination-free drilling of composite laminates. *ASME J Eng Indust* 1994;116:475–81.
- [28]. Jane Maria FP, Sergio M, Mirabel CR. Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. *Mat. Res.* 2005;8(1).
- [29]. Stone R, Krishnamurthy K. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates. *Int J Mach Tools Manuf* 1996;36:985–1003
- [30]. Durao P, Goncalves JS, Tavares RS, Albuquerque C, Vieira A, Marques T. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Compos Struct* 2010;92(7):1545–50.
- [31]. Davim JP, Reis P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study. *Mater Des* 2003;24:315–24.
- [32]. Davim JP, Rubio JC, Abrao AM. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos Sci Technol* 2007;67:1939–45.
- [33]. Tsao CC, Hocheng H. Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials. *Int J Mech Sci* 2007;49:983–8.
- [34]. Capello E. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. *J Mater Process Technol* 2004;148:186–95.

- [35]. Shyha IS, Soo SL, Aspinwall D, Bradley S. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites. *J Mater Process Technol* 2010;210:1023–34.
- [36]. Khashaba UA. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Compos Struct* 2004;63:313–27.
- [37]. Khashaba UA, EI-Sobaty IA, Selmy AI, Megahed AA. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear. *Composites: Part A* 2010;41:1130–7.
- [38]. Faraz A, Biermann D, Weinert K. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *Int J Mach Tools Manuf* 2009;49:1185–96.
- [39]. Rawat S, Attia H. Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drill during dry high speeddrilling of woven carbon fibre composites. *Wear* 2009;267:1022–30.
- [40]. Davim JP, Reis P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) using design experiments. *Compos Struct* 2003;59:481–7.
- [41]. Tsao CC. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill. *Mater Des* 2008;29:1740–4.
- [42]. Hocheng H, Tsao CC. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. *Int J Mach Tools Manuf* 2006;46:1403–16.
- [43]. Ozden Isbilir, Elaheh Ghassemieh. Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites. *Composite Structures*, Volume 105, November 2013, Pages 126-133
- [44]. E. Uhlmann, F. Sammler, S. Richarz, F. Heitmüller, M. Bilz. Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics. *Procedia CIRP*, Volume 24, 2014, Pages 19-24

- [45]. Mihai-Bogdan L, Paul X. Experimental analysis of drillin fiber reinforced composites. *International journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 51, Issue 12, December 2011, Pages 937-946.
- [46]. Sanjay Mazumdar. *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press, 27 dic. 2001 - 416
- [47]. Sheikh-Ahmed, J. Y., *Machining of polymer composites*. 2009, New York: Springer, ISBN: 9780387355399.
- [48]. Liu DF, Tang YJ, Cong WL. A review of mechanicaldrilling for composite laminates.*Compos Struct* 2012; 94: 1265–79.
- [49]. Lopez De Lacalle N, Lamikiz A, Campa FJ, Valdivieso A, Etxeberria I. Design and test of a multitooth tool for CFRP milling. *J Compos Mater* 2009; 43:3275–90.
- [50]. Girot F, Iliescu D, Valdivieso AF, Gutierrez- Orrantia ME, Lopez de Lacalle NL. Experimentalstudy and modelling of tool wear during drilling and trimming of CFRP. *Revue des Composites et des Materiaux Avances* 2013; 23(3):357–85.
- [51]. Santiuste C, Barbero E, Miguelez MH. Computational analysis of temperature effect in composite bolted joints for aeronautical applications. *J Reinf Plast Compos* 2011; 30:3–11.
- [52]. Santiuste C, Olmedo A, Soldani X, Miguelez MH. Delamination prediction in orthogonal machining of carbon long fiber reinforcedpolymer composites. *J Reinf Plast Compos* 2012; 31:875–85.
- [53]. Krishnaraj V, Zitoun R, Davim JP. *Drilling of polymer-matrix composites*. Heidelberg: Springer, 2013.
- [54]. Davim JP. *Drilling of composite materials*. New York: NOVA Publishers, 2009.

- [55]. Feito N, Lopez-Puente J, Santiuste C, Miguelez MH. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling. *Compos Struct* 2014; 108:677–83.
- [56]. Abrao AM, Campos Rubio JC, Faria PE, Davim JP. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination whendrilling glass fibre reinforced plastic composite. *Mater Des* 2008; 29(2):508–13.
- [57]. Lazar MB, Xirouchakis P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites. *Int J Mach Tools Manuf* 2011; 51:937–46.
- [58]. Shyha S, Aspinwall DK, Soo SL, Bradley S. Drill geometry and operating effects whencutting small diameter holes in CFRP. *Int J Mach Tools Manuf* 2009; 49:1008–14.
- [59]. Xu J, An Q, Chen M. A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills indrilling high-strength T800S/250F CFRP. *Compos Struct* 2014; 117:71–82.
- [60]. Marques T, Durao M, Magalhaes A, Silva JF, Tavares RS. Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: evaluation of a special step drill. *Compos Sci Technol* 2009; 69:2376–23.
- [61]. Piquet R, Lachaud F, Ferret B, Swider P. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills. *Compos Part A* 2000; 31(10):1107–15.
- [62]. Grilo TJ, Paulo RMF, Silva CRM, Davim JP. Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. *Compos Part B* 2013; 45:1344–50.
- [63]. Imagen broca Brad [en línea]. (Última visita: Marzo 2017) Disponible en Web: <http://www.montanabrandtools.com/products/bradpoint-drill>.
- [64]. Imagen broca Dagger [en línea]. (Última visita: Marzo 2017) Disponible en Web: <http://superiortoolservice.com.nobullsoftware.com/Composite.aspx>.

- [65]. Karpas Y, Bahtiyar O, Deger B, Kaftanoğlu B. A mechanistic approach to investigate drilling of UD-CFRP laminates with PCD drills. *CIRP Ann – Manuf Tech* 2014; 63:81–4.
- [66]. Tsao CC, Chiu YC. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills. *Int J Mach Tools Manuf* 2011;51:740–4.
- [67]. Murphy C, Byrne G, Gilchrist MD. The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials. *Proc Instn Mech Engrs, Part B: J Eng Manuf* 2002;216:143–52.
- [68]. Sandvik Coromant. *Modern metal cutting: a practical handbook*. 1st ed. North American, Sandviken, Sweden: Sandvik Coromant, 1994.
- [69]. Ramirez C, Poulachon G, Rossi F, M'Saoubib M. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. In: *Procedia CIRP* (ed) 2nd conference on surface integrity (CSI), Nottingham, UK, 28 May–30 May 2014, pp. 163–168.
- [70]. Mondelin A, Furet B, Rech J. Characterisation of friction properties between a laminated carbon fibres reinforced polymer and a monocrystalline diamond under dry or lubricated conditions. *Tribol Int* 2010; 43:1665–73.
- [71]. Diaz-Alvarez J, Olmedo A, Santiuste C, Miguelez MH. Theoretical estimation of thermal effects in drilling of woven carbon fiber composite. *Mater* 2014; 7:4442–54.
- [72]. Santiuste C, Diaz-Alvarez J, Soldani X, Miguelez MH. Modelling thermal effects in machining of carbon fiber reinforced polymer composites. *J Reinf Plast Compos* 2014; 33:758–66.
- [73]. M. Rodríguez-Millán, T. Ito, J.A. Loya, A. Olmedo, M.H. Miguélez. Development of numerical model for ballistic resistance evaluation of combat helmet and experimental validation. *Materials and Design* 2016;110:391–403

- [74]. G.R. Bishop, N.N.Z. Gindy. An investigation into the drilling of ballistic Kevlar composites. *Composites Manufacturing* 1990; 1(3):155-159.
- [75]. A. di Ilio, V. Tagliaferri, F. Veniali. Cutting mechanisms in drilling of aramid composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1991; 31(2): 155-165.
- [76]. F. Veniali, A. di Ilio, V. Tagliaferri. An experimental study of the drilling of aramid composites. *J. Energy Resour* 1995; 117(4): 271-278.
- [77]. D. Bhattacharyya, D. P. W. Horrigan. A study of hole drilling in kevlar composites. *Composites Science and Technology* 1998; 58(2): 267-283.
- [78]. Am.Mufarrih, Bobby O.P Soepangkat, Iwan Krisnanto. Multi Response Optimization using Taguchi-Grey-Fuzzy Method in Drilling of Kevlar Fiber Reinforced Polymer(KFRP) Stacked. *Applied Mechanics and Materials* 2016; 836: 179-184.
- [79]. A. N. Shuaib, F. A. Al-Sulaiman, F. Hamid. Machinability of Kevlar 49 Composite Laminates While Using Standard TiN Coated HSS Drills. *Machining science and technology* 2004; 8(3): 449-467.
- [80]. M. S. Won, C. K. H. Dharan. Drilling of Aramid and Carbon Fiber Polymer Composites. *J. Manuf. Sci. Eng* 2002; 124(4): 778-783.
- [81]. Lei Zheng, Hai Zhou, Chao Gao, Juntang Yuan. Hole drilling in ceramics/Kevlar fiber reinforced plastics double-plate composite armor using diamond core drill. *Materials and Design* 2012; 40: 461-466.
- [82]. Hang Gao, Yuan Zhuang, Ben Wang, Junliang Huang. Study on the Combined Machining Technology of Sawing and Grinding for Drilling Aramid/epoxy Composites. *Advanced Materials Research* 2012; 565: 436-441.

- [83]. F. Wu, J. G. Zhu, H. M. Xie. Investigation of Residual Stress in 2D Plane WeaveAramid Fibre Composite Plates Using MoiréInterferometry and Hole-Drilling Technique. *Strain* 2015; 51: 429-443.
- [84]. Olmedo A, Santiuste C, Barbero E. An analytical model for predicting the stiffness and strength of pinned-joint composite laminates. *Compos Sci Tech* 2014;90:67-73.
- [85]. Soldani X, Santiuste C, Muñoz-Sánchez A, Miguélez MH. Influence of tool geometry and numerical parameters when modeling orthogonal cutting of LFRP composites. *Compos Part A: Appl Sci* 2011;42(9):1205-1216.
- [86]. Campos Rubio JC, Abrao AM, Faria PE, Esteves Correia A, Davim JP. Effects of high speed in the drilling of glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2008; 48(6):715-720
- [87]. Rubio-López A, Olmedo A, Santiuste C. Modelling impact behaviour of all-cellulose composite plates. *Compos Struct* 2015;122:139-43.
- [88]. Arbelaiz A, Fernandez B, Cantero G, Llano-Ponte R, Valea A, Mondragon I. Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization. *Comp Part A: Appl Sci* 2005;36(12):1637-1644.
- [89]. Rubio-López A, Olmedo A, Díaz-Álvarez A, Santiuste C. Manufacture of compression moulded PLA based biocomposites: A parametric study. *Compos Struct* 2015;131:995-1000.
- [90]. Satyanarayana KG, Arizaga GG, Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—an overview. *Prog Polym Sci* 2009;34(9):982-1021.
- [91]. Gonzalez-Sanchez C, Martínez-Aguirre A, Pérez-García B, Martínez-Urreaga J, María U, Fonseca-Valero C. Use of residual agricultural plastics and cellulose fibers for obtaining sustainable eco-composites prevents waste generation. *J Clean Prod* 2014;83:228-237.

- [92]. Dittenber DB, GangaRao HV. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Compos Part A: Appl Sci* 2012;43(8):1419-1429.
- [93]. Al-Oqla FM, Sapuan SM. (2014). Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *J Clean Prod* 2014;66:347-354.
- [94]. Zamri MH, Osman MR, Akil H, Shahidan MHA, Ishak ZM. Development of green pultruded composites using kenaf fibre: influence of linear mass density on weathering performance. *J Clean Prod* 2016;125:320-330.
- [95]. Pickering KL, Efendy MA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos Part A: Appl Sci* 2016;83:98-112.
- [96]. Kovacevic Z, Bischof S, Fan M. The influence of *Spartium junceum* L. fibres modified with montmorillonite nanoclay on the thermal properties of PLA biocomposites. *Compos Part B: Eng* 2015;78:122-130.
- [97]. Huber T, Pang S, Staiger MP. All-cellulose composite laminates. *Compos Part A: Appl Sci* 2012;43(10):1738-1745.
- [98]. Summerscales J, Dissanayake N, Virk A, Hall W. A review of bast fibres and their composites. Part 2—Composites. *Compos Part A: Appl Sci* 2010;41(10):1336-1344.
- [99]. Alves C, Silva AJ, Reis LG, Freitas M, Rodrigues LB, Alves DE. Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. *J Clean Prod* 2010;18(4):313-327.
- [100]. Brouwer WD. Natural Fiber Composites, Saving Weight and Cost with Renewable Materials. Thirteenth International Conference on Composite Materials 2001.
- [101]. Davim JP. Machining composite materials. London: ISTE-Wiley; 2009. ISBN: 978-1-84821-103-4.

- [102]. Sridharana V, Muthukrishnanb N. Optimization of Machinability of Polyester/Modified Jute Fabric Composite Using Grey Relational Analysis (GRA). *Proc Eng* 2013;64:1003-1012.
- [103]. Abilash N, Sivapragash M. Optimizing the delamination failure in bamboo fiberreinforced polyester composite. *Journal of King Saud University-EngineeringSciences* 2013.
- [104]. Athijayamani A, Thiruchitrambalam M, Natarajan U, Pazhanivel B. Influence of alkali-treated fibers on the mechanical properties and machinability of roselle and sisal fiber hybrid polyester composite. *Polym Compos* 2010;31(4):723-731.
- [105]. Nasir AA, Azmi AI, Khalil ANM. Measurement and optimisation of residual tensile strength and delamination damage of drilled flax fibre reinforced composites. *Measurement* 2015;75:298-307.
- [106]. Bajpai PK, Debnath K, Singh I. Hole making in natural fiber-reinforced polylactic acid laminates. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2015.
- [107]. Ramesh, M., Palanikumar, K., & Reddy, K. H. (2014). Influence of Tool Materials on Thrust Force and Delamination in Drilling Sisal-glass FiberReinforced Polymer (S-GFRP) Composites. *Proc Mater Sci*, 5, 1915-1921.
- [108]. Arola D, Ramulu M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis. *Int J Mech Sci* 1997;39:597–613.
- [109]. Mahdi M, Zhang L. A finite element model for the orthogonal cutting of fiber reinforced composite materials. *J Mater Process Technol* 2001;113:368–72.
- [110]. Santiuste C, Soldani X, Miguélez MH. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components. *Compos Struct* 2010;92:691–8.
- [111]. Santiuste C, Miguélez MH, Soldani X. Out-of-plane failure mechanisms in LFRP composite cutting. *Compos Struct* 2011;93:2706–13.

- [112]. Durao LMP, de Moura MFSF, Marques AT. Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates. *Composites Part A* 2006;37:1325–33.
- [113]. Durao LMP, de Moura MFSF, Marques AT. Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composite laminates. *Eng Fract Mech* 2008;75:2767–78.
- [114]. Singh I, Bhatnagar N, Viswanath P. Drilling of uni directional glass fiber reinforced plastics: experimental and finite element study. *Mater Des* 2008;29:546–53.
- [115]. Upadhyay PC, Lyons JS. On the evaluation of critical thrust for delamination free drilling of composite laminates. *J Reinf Plast Comp* 1999;18:1287–303.
- [116]. V.A. Phadnis, F. Makhadmeh, A. Roy, V.V. Silberschmidt. Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation. *Compos Part A*, 47 (2013), pp. 41-51.
- [117]. J.P. Fan, C.P. Tsui, C.Y. Tang. Modeling of the mechanical behavior of HA/PEEK biocomposite under quasi-static tensile load. *Materials Science and Engineering A* 2004; 382:341–350
- [118]. N. Nayak, A. Banerjee, T. R. Panda. Numerical study on the ballistic impact response of aramid fabric-epoxy laminated composites by armor piercing projectile. *Procedia Engineering* 2017;173:230-237.
- [119]. Roser Costa, Ramon Orriols. Man-Made Mineral Fibers and The Respiratory Tract. *Arch Bronconeumol* 2012;48:460-8 - Vol. 48 Núm.12 DOI: 10.1016
- [120]. Ficha técnica del dinamómetro rotativo piezoeléctrico rotativo Kistler Modelo 9123C [en línea]. (Última visita: Marzo 2017) Disponible en Web: <https://www.kistler.com/vn/en/>
- [121]. Ochi S. Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mech Mater* 2008;40(4):446-52.

[122]. Feito N, Diaz-Alvarez A, Cantero JL, Rodriguez-Millan M, Miguelez, H. Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs. *J Reinf Plast Compos* 2016;35(1):33-55.

[123]. Rubio-López A, Hoang T, Santiuste C. Constitutive model to predict the viscoplastic behaviour of natural fibres based composites. *Compos Struct* 2016;155:8-18.

[124]. Persson A, Karlsson F. Modelling non-linear dynamics of rubber bushings parameter identification and validation [Ph.D. thesis]. Lund University; 2003.

